

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Měření charakteristik pneumatických  
průtočných prvků**

**Measurement of Characteristics of  
Pneumatic Components**

Student:

Štěpán Chmura

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## Zadání bakalářské práce

Student: **Štěpán Chmura**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**  
Téma: **Měření charakteristik pneumatických průtočných prvků**  
**Measurement of Characteristics of Pneumatic Components**  
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

- 1) Uveďte popis měření pneumatických průtočných prvků (rozváděče, škrticí ventily, tlakové ventily atd.).
- 2) Proveďte návrh měřicí tratě, volbu měřidel a popis metodiky měření.
- 3) Realizujte měření průtokových charakteristik vybraných pneumatických prvků.
- 4) Proveďte vyhodnocení měření a porovnání s katalogovými hodnotami.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy Díl I. - Pneumatické prvky a systémy*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005. 275 s. ISBN 80-248-0879-X.  
KOLEKTIV AUTORŮ. *SMC Training - Stlačený vzduch a jeho využití*. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.  
BEATER, P. *Pneumatic Drives: System Design, Modeling and Control*. Berlín: Springer, 2007. 323 p. ISBN 978-3540-69470-0.  
MURRENHOF, H., REINERTZ, O. *Fundamentals of Fluid Power Part 2: Pneumatics*. Aachen: Shaker Verlag, 2014. 333 p. ISBN 978-3-8440-3213-0.  
Katalogy a firemní prospekty.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Kamil Fojtášek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016  
Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ...15. 5. 2017.....

.....



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:.....15.5.2017.....



.....  
podpis

Chmura Štěpán

Šumice 17, 687 31

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

CHMURA, Š. *Měření charakteristik pneumatických průtočných prvků: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2017, 55 s., Vedoucí práce: Fojtášek, K.

V rámci své bakalářské práce se zabývám měřením charakteristik pneumatických průtočných prvků. Konkrétně se jedná o redukční ventil, škrticí ventil a rozváděč. Při realizaci měření je nutné dodržovat určitý jasně stanovený postup a vycházet z platných norem pro měření pneumatických průtočných prvků. Na jejich základě byla navržena měřicí trať, provedena volba měřidel a uvedena metodika měření. Následně byla provedena samotná realizace měření v laboratoři katedry. Vyhodnocení naměřených dat formou charakteristik a jejich následné porovnání s katalogovými hodnotami, nám popisuje funkci daného prvku a jeho vliv na chování celého pneumatického systému.

Klíčová slova: průtočné charakteristiky, pneumatické prvky, měření charakteristik

## ANNOTATION OF BACHELORY THESIS

CHMURA, Š. *Measurement of characteristics of pneumatic components: Bachelor thesis*. Ostrava, VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2017, 55s., Thesis head: Fojtášek, K.

In my bachelor thesis I deal with measurement of characteristics of pneumatic components. Specifically it is reduction valve, a throttle valve and switchboard. During realization of measurement it is important to observe certain procedure and to follow the valid standards for the measurement of pneumatic components. Based on valid standards, the measurement track was designed, the choice of gauges was made and the measurement methodology was presented. Consequently, the measurement itself was carried out in the laboratory of department. The evaluation of the measured data in terms of characteristics and their subsequent comparison with the catalog values describes the function of certain element and its influence on the behavior of the whole pneumatic system.

Key words: flow characteristics, pneumatic components, measurement of characteristics

## OBSAH

Seznam použitých symbolů .....	8
Úvod .....	9
1. Měřené veličiny, rozsahy měřených veličin a přesnost měření .....	10
1.1 Měřené veličiny .....	10
1.2 Rozsahy měřených veličin .....	10
1.3 Dovolené chyby měření .....	11
2. Měření hlavních veličin .....	13
2.1 Měření tlaku .....	13
2.1.1 Volba manometru .....	13
2.1.2 Umístění manometru .....	13
2.2 Měření průtoku .....	14
2.2.1 Volba měřicího zařízení .....	14
2.3 Měření teploty .....	16
3. Všeobecné požadavky pro zkoušení pneumatických prvků .....	17
4. Charakteristiky měřených pneumatických prvků .....	18
4.1 Charakteristiky rozváděče .....	18
4.2 Charakteristika škrticího ventilu .....	19
4.3 Charakteristika redukčního ventilu .....	20
5. Postup výpočtu pneumatického obvodu dle různých autorů .....	22
5.1 Výpočet podle skript .....	22

5.2 Postup výpočtu a měření podle SMC.....	26
6. Návrh měřicí trati .....	33
6.1 Popis metodiky měření redukčního ventilu .....	34
6.2 Popis metodiky měření škrticího ventilu .....	35
6.3 Popis metodiky měření 5/2 rozváděče .....	36
7. Přehled použitých prvků a snímačů.....	37
7.1 Přehled měřených prvků .....	37
7.2 Přehled měřicích zařízení.....	39
8. Měření charakteristik jednotlivých prvků .....	42
8.1 Realizace měření pro redukční ventil .....	42
8.2 Realizace měření pro škrticí ventil .....	44
8.3 Realizace měření pro rozváděč .....	45
9. Závěr.....	48
10. Literatura .....	50

**Seznam použitých symbolů**

Značka	Název veličiny	Jednotka
C	zvuková vodivost	$[\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}]$
$C_v$	Přepočtový faktor	$[\text{gal} \cdot \text{min}^{-1}]$
D	průměr vzdušníku	[m]
$D_n$	světlost potrubí	[m]
I	elektrický proud	[A]
$K_v$	průtokový součinitel	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$
Q	objemový průtok	$[\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$
$Q_N, q_n$	normální objemový průtok	$[\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$
S	průřez	$[\text{m}^2]$
T	teplota	$[^{\circ}\text{C}]$ [K]
$T_N$	normální teplota	$[^{\circ}\text{C}]$
U	napětí	[V]
V	objem	$[\text{m}^3]$
b	kritický tlakový poměr	[- ]
d	průměr	[m]
g	gravitační zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
h	výška	[m]
$k_v$	Průtokový součinitel	$[\text{l}_n/\text{min}]$
n	otáčky, pootevření ventilu	[ot]
p	tlak	[Pa]
$p_1$	vstupní tlak	[Pa]
$p_2$	výstupní tlak	[Pa]
$p_N$	normální tlak	[Pa]
$p_s$	tlak před vypuštěním	[Pa]
r	plynová konstanta	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
t	čas	[s]
$\Delta p$	skutečná tlaková difference	[Pa]
$\Delta p_1, \Delta p_2$	Dílčí tlakové difference	[Pa]
$\phi$	poměrné otevření	[- ]
$\rho$	hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$



## Úvod

Pneumatické mechanismy jsou součástí různých strojů a výrobních či manipulačních zařízení. Skládají se z jednotlivých pneumatických prvků a musí zajistit dosažení požadovaných parametrů a spolehlivost funkce těchto strojů. Z tohoto důvodu je nutné, aby jednotlivé pneumatické prvky zaručily splnění jejich funkce s požadovanou spolehlivostí. Konstrukce pneumatických prvků je většinou prováděna podle zkušeností, intuice a s využitím různých vzorců. Vzhledem ke složitosti převodů průtokových poměrů stlačeného vzduchu se výpočty dělají jen velmi přibližně. Důkladnější pevnostní výpočty s ohledem na velikosti pracovních tlaků se mnohdy neprovádějí, obvykle jen u silových pneumatických prvků jako jsou pneumomotory.

Vzhledem k tomu že charakteristiky pneumatických prvků bývají v katalozích uváděny jen málokdy a parametry jsou mnohdy uvedeny jen ve svých jmenovitých hodnotách, nabývá významné role experimentální zjištění parametrů a charakteristik pneumatických prvků. Ověření těchto parametrů a charakteristik se provádí pomocí přesně stanovených zkoušek a měření.

V mém případě se bude jednat o měření kontrolní, navazující na diplomovou práci týkající se návrhu zkušebního zařízení pneumatických rotačních motorů. Tato měření se soustředí na získání základních charakteristik a parametrů vybraných pneumatických průtočných prvků a jejich účelem je zjištění shody, či odchylky od parametrů uvedených v katalozích výrobců.

# **1. Měřené veličiny, rozsahy měřených veličin a přesnost měření**

Při zkouškách a měření pneumatických prvků se potýkáme s nutností měřit různé fyzikální veličiny s různými jednotkami a rozdílnou přesností. Jedná se jednak o veličiny hlavní, tyto veličiny udávají hlavní parametry prvku a jeho závislosti. A také o veličiny vedlejší, tyto veličiny blíže definují pracovní parametry nebo určují stav stlačeného vzduchu [1].

## **1.1 Měřené veličiny**

Mezi hlavní veličiny patří:

- Tlak, tlakový spád, podtlak
- Objemový průtok vzduchu
- Rychlost a otáčky
- Dráha
- Točivý moment
- Síla
- Teplota

Mezi vedlejší veličiny patří:

- Čas
- Elektrický proud, napětí, odpor
- Čistota a vlhkost vzduchu

## **1.2 Rozsahy měřených veličin**

Vzhledem k různému použití a velikosti pneumatických prvků jsou rozsahy veličin v docela širokém rozmezí. A proto uvedené rozsahy v *Tab.č.1* jsou pouze orientační a jsou mezi jejich minimálními a maximálními hodnotami [1].

Tab. č. 1 Rozsahy měřených veličin [1]

tlak	0,02	až	1,5	MPa
tlakový spád	1,6	až	400	kPa
podtlak	10	až	100	kPa
objemový průtok	0,5	až	400	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
rychlost	0,05	až	4	m.s <sup>-1</sup>
otáčky	10	až	70000	min <sup>-1</sup>
síla	0,5	až	100000	N
točivý moment	0,5	až	400	N.m
dráha	0,001	až	5	m
výkon	0,1	až	50	kW
teplota	-20	až	60	°C
čas	0,1	až	1000	s
elektrický proud	0,01	až	100	A
elektrické napětí	12,24,48 ss V: 12,24,48,110,220, st V/50,60, Hz			

### 1.3 Dovolené chyby měření

Přesnost měření daných veličin je ovlivněna druhem zkoušky a platí dovolené chyby měření, určené normou ČSN 10 9008, popsané v Tab. č. 2 se dvěma skupinami přesností. Skupina přesnosti 1 odpovídá typovým periodickým zkouškám a skupina přesnosti 2 odpovídá provozním zkouškám [1].

Tab. č. 2 Dovolené chyby měření [1]

Parametr	Dovolená chyba měření pro skupiny přesnosti	
	1	2
Tlak a rozdíl tlaků do 0,2 MPa, %	3,0	5,0
Tlak a rozdíl tlaků nad 0,2 MPa, %	1,5	2,5
Průtok,	3,0	5,0
Síla %	1,5	3,0
Točivý moment %	1,0	2,0
Čas %	2,5	5,0
Otáčky %	1,0	2,0
Objem %	1,0	2,5
Hmotnost %	1,0	2,0
Teplota [°C]	1,0	2,0

Dovoleným chybám uvedeným v Tab. č.2 musí také odpovídat dovolená chyba užitých měřicích zařízení. Pro měření elektrických veličin nejsou uváděny

přesnosti, protože přístroje pro měření těchto veličin jsou mnohem přesnější než hodnoty uváděné v tabulce.

K dosažení důvěryhodných výsledků je nutné udělat tolik měření, aby dovolená chyba měření toho určitého parametru odpovídala hodnotě uvedené v tabulce. Počet měření musí být větší nebo roven třem. Výsledkem měření uvažujeme střední aritmetickou hodnotu výsledků měření. Odchylka naměřených hodnot od střední aritmetické hodnoty nesmí být větší než dovolená chyba měření uvedená v *Tab. č.2* [1].

## 2. Měření hlavních veličin

### 2.1 Měření tlaku

Hlavním požadavkem při měření pneumatických prvků je měření tlaku, tlakové ztráty a podtlaku. Nejčastěji se jedná o měření statického tlaku. Měření statického tlaku je nejčastěji realizováno manometry s deformačním členem – Bourdonovou trubicí. Tyto přístroje pro měření se vyrábí v širokém sortimentu rozdílných provedení podle velikosti a přesnosti. Jsou snadno připevnitelné a lze z nich snadno odečíst hodnoty.

Pro měření menších tlaků do  $50 \text{ kPa}$  a pro měření tlakových diferencí do  $100 \text{ kPa}$  se také mohou použít kapalinové manometry – U trubice. Pro změření tlaku nebo tlakového rozdílu v U trubici se využívá rozdíl hladin kapalinového sloupce  $h$ . Tlak se tedy vypočítá z rovnice  $p = \rho \cdot g \cdot h$  kde  $\rho$  je hustota kapaliny v trubicích, obvykle se používá rtuť, voda nebo líh [1].

#### 2.1.1 Volba manometru

Rozsah manometru zvolíme tak, aby očekávaná měřená hodnota tlaku byla zhruba  $2/3$  rozsahu stupnice při stálém zatížení. Pokud očekáváme, že hodnota tlaku nebude ustálená tak volíme rozsah manometru dvojnásobný. Pro měření dynamického tlaku se používají snímače pracující převážně na tenzometrickém principu. Na Obr. 1 je ukázán manometr se spodním připojením [1].

#### 2.1.2 Umístění manometru

Manometr umístíme podle předpisu normy ČSN 10 9008 minimálně  $5d$  před zkoušeným prvkem a  $10d$  za zkoušeným prvkem toto umístění je z důvodu zabránění vlivu turbulence v kanálech na přesnost měření,  $d [\text{mm}]$  je světlost vedení [1].



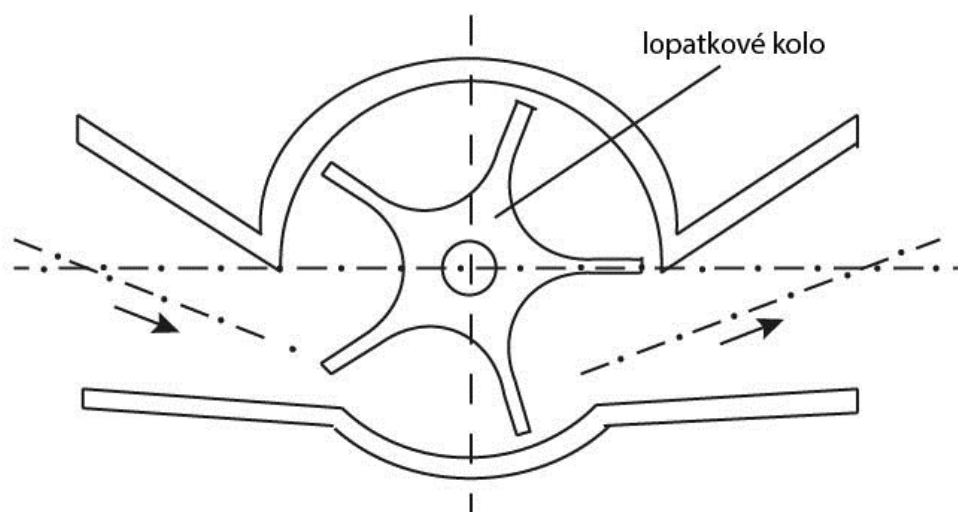
*Obr. 1 Manometr [2]*

## 2.2 Měření průtoku

Průtok je další základní veličina specifikující každý pneumatický prvek. Průtok také zahrnujeme do výpočtů návrhů pneumatického systému. Označuje se  $Q$  a udává objemový průtok s jednotkami  $m^3 \cdot h^{-1}$ ,  $m^3 \cdot s^{-1}$  nebo  $dm^3 \cdot min^{-1}$ . Průtok v pneumatice je ve skutečnosti spotřebován a to v tom smyslu že je odváděn pomocí výfukového kanálu zpět do ovzduší, proto je u některých prvků uváděna spotřeba vzduchu. Norma ČSN 10 9008 blíže nespecifikuje jednoznačný postup při měření průtoku. Nejčastěji se průtok měří pomocí škrticích orgánů (clona, dýza), rotometr anebo turbínový průtokoměr [1].

### 2.2.1 Volba měřicího zařízení

Pro správnou volbu měřicího zařízení je nutné znát, kde chceme průtok měřit. Buď je požadavek měřit průtok na vstupu do prvku, tj. v tlakovém potrubí anebo na výstupu z prvku, tj. v odpadním potrubí. Měření průtoku v tlakovém potrubí není až tak časté a měří se buď pomocí průřezového měřidla, který obsahuje potřebnou měřicí aparaturu, pro měření tlakového spádu, se zdrojem, korekčním členem a měřicím přístrojem. Toto měření je popsáno v normě ČSN 25 7710 není však moc výhodné vzhledem k minimálnímu průřezu vedení pro připojení průřezového měřidla  $D_n = 50$  mm, jelikož světlosti pneumatických prvků mohou být podstatně menší až  $D_n = 1,6$  mm, proto je toto měření nedoporučováno. O mnoho lepší přístroje pro měření průtoku jsou lopátkové průtokoměry *Obr. 2*, tyto průtokoměry kombinují měřicí turbínu a elektronické vyhodnocovací zařízení s analogovým nebo číslicovým odečtem hodnot. Díky elektronickému vyhodnocení lze naměřené hodnoty zjistit dálkově a také získaná data můžeme ukládat a dále zpracovávat v počítači. Přesnost měření je  $\pm 2,5$  % v maximálním rozsahu, což odpovídá požadované přesnosti pro měření průtoku podle normy ČSN 10 9008 [1].



Obr. 2 Lopatkový průtokoměr [3]

Měření průtoku se častěji realizuje v odpadním vedení a to těmito čtyřmi metodami.

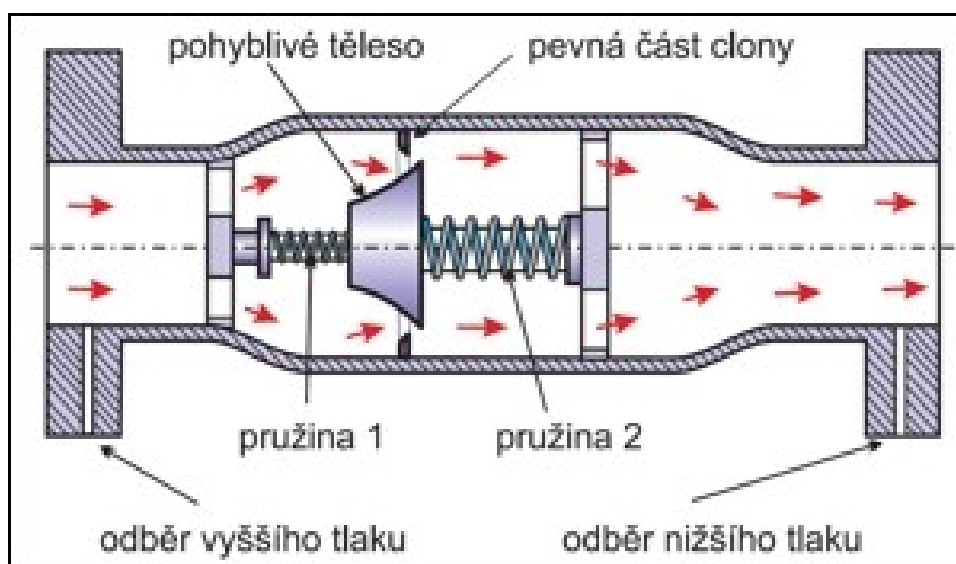
- Rotametr
- Plynoměr
- Výtok dýzou
- Vyprazdňování vzdušníku

Rotametr Obr. 3 pracuje na principu unášení plováku proudem měřeného vzduchu kuželovou trubicí. Měření je realizováno indukčním snímačem polohy nebo bezdotykově a měří se zdvih plováku v trubici, závislost zdvihu na průtoku ale není lineární. Rozsah měření lze ovlivnit výměnou trubic a je v rozmezí 0,1 až  $10^4 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  s přesností do 2%.

Plynoměr pracuje na principu měření proteklého objemu vzduchu při použití měřiče času, tímto se dá určit objemový průtok za čas.

Měření průtoku výtokem dýzou můžeme uskutečnit, pokud poměr tlaku okolí  $p_a$  a tlaku  $p_1$  před dýzou je menší než kritická hodnota 0,528. Měření je celkem jednoduché, protože stačí znát pouze teplotu  $T_1$  před dýzou a měřený absolutní tlak

$p_1$  před dýzou, poté se počítá podle vzorce  $Q_N = 0,0275 \cdot d^2 \cdot \frac{p_1}{\sqrt{T_1}} \cdot \frac{T_N}{p_N}$  kde  $d$  [mm] je průměr otvoru v dýze a  $T_N$  a  $p_N$  jsou normální hodnoty teploty a tlaku okolí [1].



Obr. 3 Rotametr [4]

## 2.3 Měření teploty

Měření teploty při zkoušení pneumatických prvků má velký význam a proto je nutné ji často měřit na několika místech najednou. Pro měření teploty v pneumatických systémech je použití běžných rtuťových teploměrů zbytečné, i když jsou tyto teploměry velmi přesné a jednoduché na obsluhu jejich křehkost je v tomto případě nežádoucí a proto se používají k měření teploty dvojkovové teploměry. Nejčastější rozsahy těchto teploměrů jsou  $0 - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$  a s přesností odečtu  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  splňují tyto teploměry požadavky příslušné normy ČSN. Pokud je požadavek na převod měřené veličiny elektronicky, používají se elektronické odporové teploměry [1].



### **3. Všeobecné požadavky pro zkoušení pneumatických prvků**

Dodržování všeobecných požadavků pro zkoušení pneumatických prvků je důležité z několika důvodů. Je potřeba zajistit určitou přesnost a důvěryhodnost naměřených výsledků a také reprodukovatelnost a opakovatelnost každého měření. Tyto všeobecné požadavky jsou u pneumatických prvků popsány v normě ČSN 10 9006. Z této normy lze sestavit následující obecné požadavky zkoušek.

Nejprve je nutné zkoušený prvek řádně prohlédnout, zajistit vnitřní i vnější čistotu prvku a jeho celistvost. Provéřit funkčnost prvku, a pokud je to nutné tak prvek seřadit podle návodu nebo jak je uvedeno v technických podmínkách.

Poté je nutno prověřit celý zkušební obvod z hlediska řádného uspořádání, funkčnosti, těsnosti a použitých měřicích zařízení. Měřicí zařízení musí mít správné měřicí rozsahy a správnou třídu přesnosti. Celý obvod musí být sestaven podle předem určeného schématu. Prvky jsou namontovány v předepsané poloze a musí být kladen důraz na dodržení bezpečnosti dle ČSN 10 9005. Všechny měřicí zařízení a snímače musí před měřením projít kontrolou anebo ocejchováním. Pokud se změní jejich parametry v důsledku používání během zkoušky je nutné je po zkoušce opět zkontrolovat. Pokud se zjistí odchylka větší než je dovolená třída přesnosti, musí být měření zopakováno.

Dále je nutné, aby každé měření proběhlo v ustáleném stavu, pokud nejsou speciální požadavky na dynamiku měřeného prvku a měření je nutné provést minimálně třikrát. Při měření se zaznamenávají všechny naměřené hodnoty veličin dále podmínky zkoušky (teplota okolí, třída znečištění vzduchu, atmosférický tlak, vibrace, rázy a další.), datum, místo měření, údaje o metodice měření a měřicích zařízeních a také schéma zkušebního systému.

Z těchto údajů vychází zpráva o zkouškách, která obsahuje hlavní technické údaje o zkoušeném prvku a jejich porovnání s výsledky měření, tyto údaje jsou obsaženy buď v tabulce anebo v grafu jako funkční závislosti.

Celkové zhodnocení a případné změny v konstrukci prvku, další provozuschopnosti či opravě tohoto prvku je uvedeno v závěru zprávy o zkouškách [1].

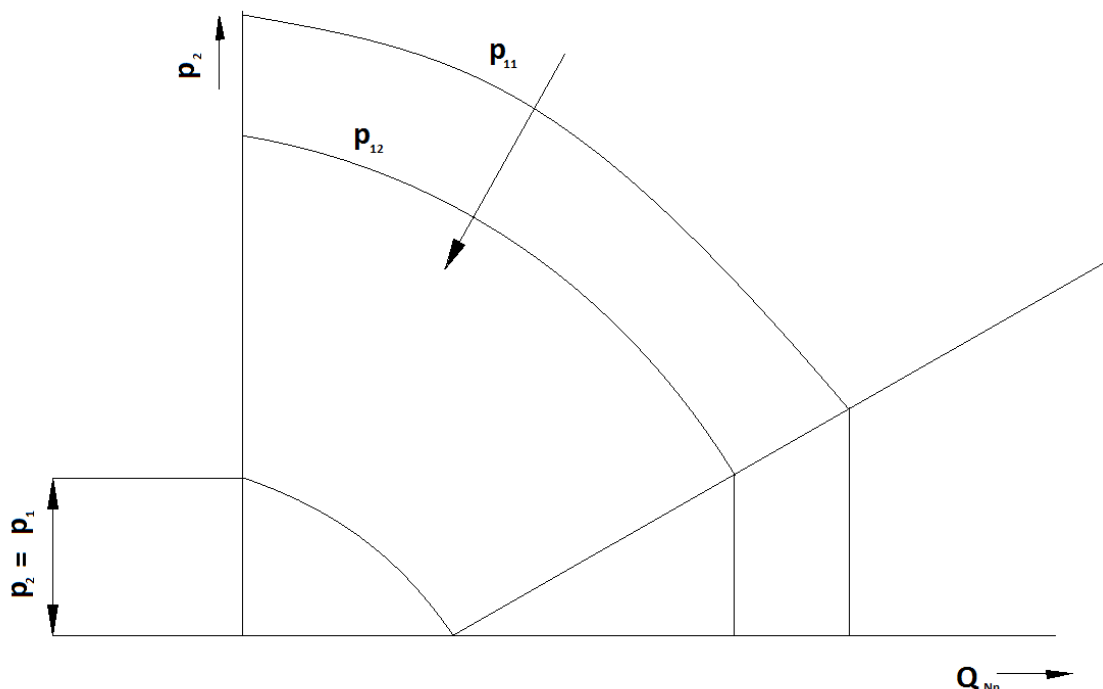
## 4. Charakteristiky měřených pneumatických prvků

V mé práci se zabývám charakteristikami průtočných pneumatických prvků, těmito prvky jsou:

- Rozváděč
- Škrticí ventil
- Redukční ventil

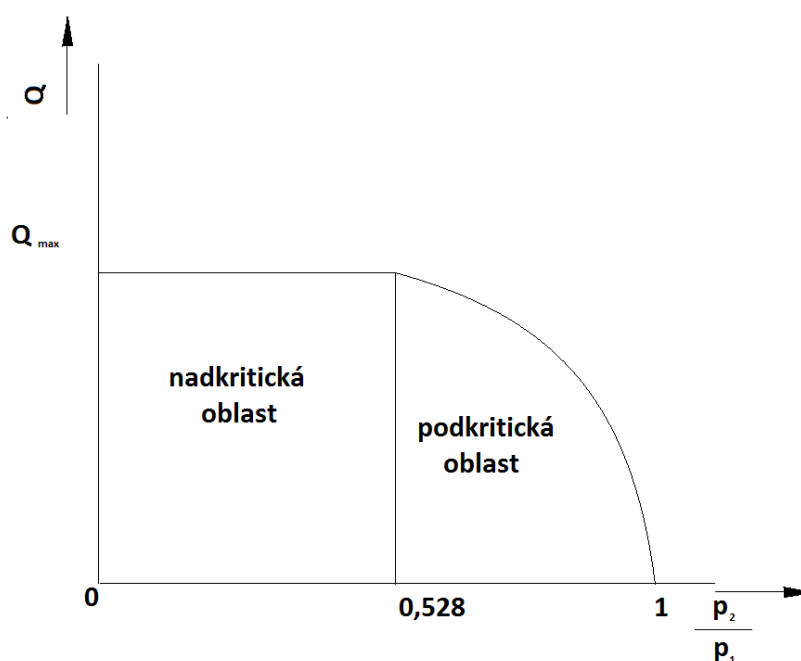
### 4.1 Charakteristiky rozváděče

Rozváděče, jako pneumatické prvky, jsou nejčastěji popsány průtokovou charakteristikou *Obr. 4* závislosti výstupního tlaku  $p_2$  na objemovém průtoku  $Q$ . Tato charakteristika je velmi přehledná a můžeme z ní snadno odečíst všechny tři na sobě závislé hodnoty. Těmito hodnotami je myšleno vstupní tlak  $p_1$ , objemový průtok  $Q$  a výstupní tlak  $p_2$ . Dále je v grafu znázorněna omezující křivka, která vychází z rovnosti tlaků  $p_2 = p_1$  a vymezuje hodnoty maximálního průtoku při kritické rychlosti, který odpovídá poměru tlaků  $\frac{p_2}{p_1} = 0,528$ . Od této hodnoty se průtok dále nezvyšuje [1].



Obr. 4 Průtoková charakteristika rozváděče

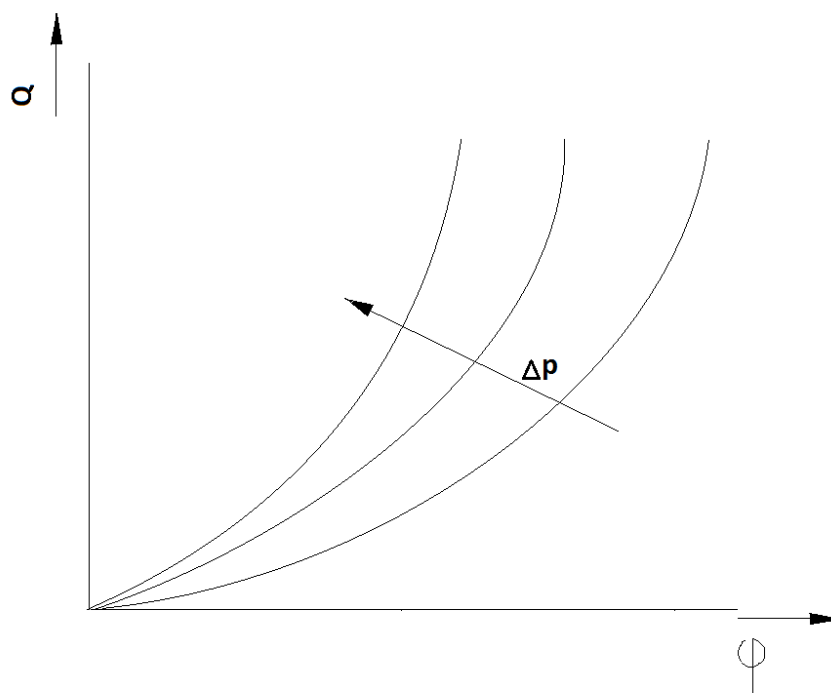
Další charakteristika, rozváděčů je závislost objemového průtoku  $Q$  na tlakovém poměru  $\frac{p_2}{p_1}$  Obr. 5. Tato závislost nám zobrazuje oblast nadkritického a podkritického proudění a maximální hodnotu průtoku  $Q[1]$  [6].



Obr. 5 Závislost objemového průtoku na poměru tlaků

## 4.2 Charakteristika škrticího ventilu

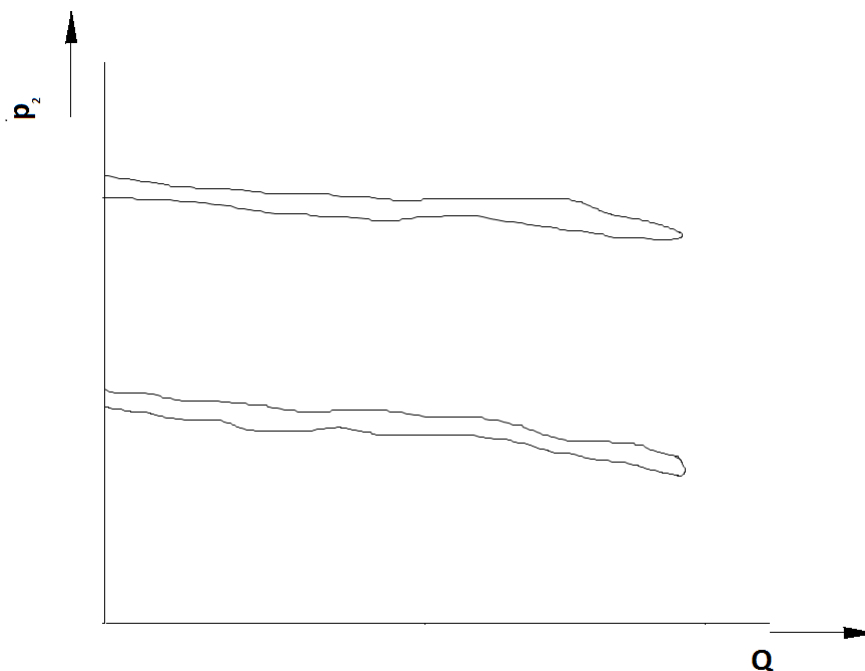
Charakteristika škrticího ventilu Obr. 6 nám udává závislost průtoku  $Q_N$  na poloze ovládacího prvku škrticího ventilu. Z charakteristiky vidíme, že průtok se zvyšuje při otevírání škrticího ventilu. Poloha škrticího ventilu je udávána jako  $\phi$  a vypočte se ze vztahu  $\phi = \frac{n}{n_{max}}$ , kde  $n$  je otevření ventilu a  $n_{max}$  je maximální počet otáček škrticího ventilu [1] [7].



Obr. 6 Závislost průtoku na otevření škrticího ventilu

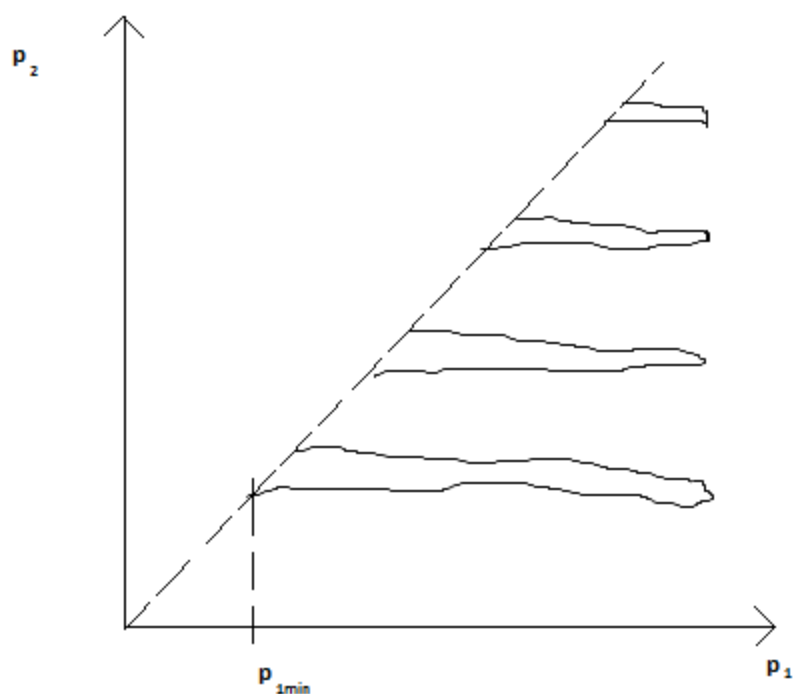
### 4.3 Charakteristika redukčního ventilu

Nejčastěji se můžeme setkat s průtokovou charakteristikou redukčního ventilu Obr. 7. Tato charakteristika nám udává závislost výstupního tlaku  $p_2$  na objemovém průtoku  $Q$  [7].



*Obr. 7 Průtoková charakteristika*

Další charakteristikou měřenou u redukčních ventilů je tlaková charakteristika *Obr. 8*. Závislost výstupního tlaku  $p_2$  na vstupním tlaku  $p_1$  při nastavení určité minimální hodnoty tlaku  $p_1[1]$ .

*Obr. 8 Tlaková charakteristika*

## 5. Postup výpočtu pneumatického obvodu dle různých autorů

Výpočet pneumatického obvodu se provádí z důvodu zjištění průtokové propustnosti. V pneumatickém obvodu je řada řídicích a jiných prvků, které mohou značně ovlivnit chod pneumatického motoru – pracovního prvku. Z tohoto důvodu se provádí kontrolní výpočty a porovnávají se z katalogovými hodnotami aby bylo možné určit vadný prvek. V mém případě jsem však nemusel provádět výpočty, protože jsem hodnoty průtoku měřil. Dále v této kapitole jsem uvedl výpočty podle dvou různých autorů, je to z toho důvodu, že každá firma se řídí dle vlastních konstrukčních návrhů a používají k vyjádření průtoku jiné koeficienty, které ale mezi sebou lze přepočítat, jak je uvedeno na *Obr. 15*.

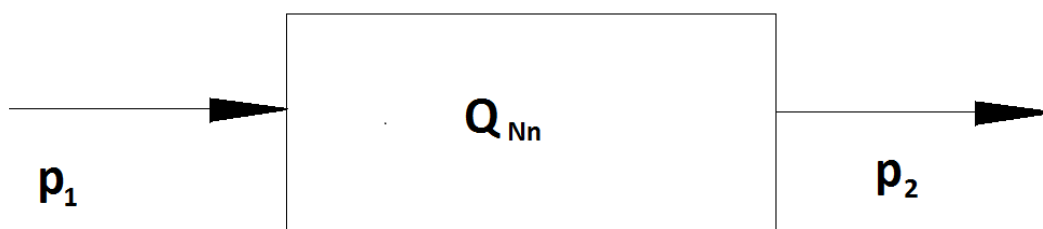
### 5.1 Výpočet podle skript

Průtoková rovnice pro jakékoliv místo v pneumatickém obvodu při podkritickém proudění je:

$$Q_{Ni} = 2,52 \cdot 10^2 \cdot K_v \cdot \sqrt{\Delta p \cdot p_2} \quad (1)$$

V této rovnici se vyskytuje koeficient  $K_v$ , který se určí pomocí nomogramu na *Obr. 11* a skutečná tlaková diference  $\Delta p = \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2}{2}$ , kde  $\Delta p_1$  a  $\Delta p_2$  jsou dílčí tlakové diference.

Tuto rovnici můžeme vyjádřit blokem *Obr. 9*.



*Obr. 9 Blokové zobrazení*

Průtokovou rovnici však lze upravit do více obecnějšího tvaru

$$Q_{Ni} = 2,52 \cdot 10^2 \cdot K_v \cdot \frac{p_1}{2} \sqrt{1 - \left( \frac{\frac{p_2}{p_1} - 0,5}{1 - 0,5} \right)^2} \quad (2)$$

Přičemž podíl  $\frac{p_2}{p_1}$  označíme jako konstantu  $r$ , která bude vždy  $<1$  a hodnotu 0,5 nahradíme obecnou konstantou  $b$ , tato konstanta byla experimentálně zjištěna firmou BOSCH a volí se:

$b = 0,5$  – pro průtok, kde v systému jsou minimální ztráty

$b = 0,3$  – pro průtok systémem, ve kterém je delší spojovací vedení s běžnými prvky a řízený průtok do atmosféry

$b = 1,0$  – pro průtok složitým systémem

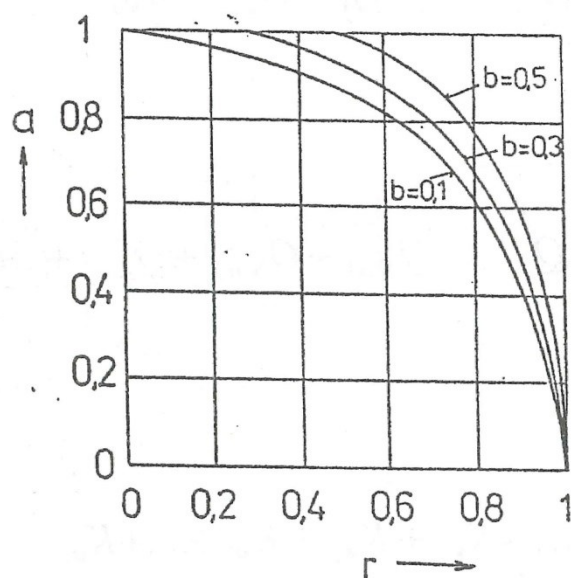
V mém případě bych uvažoval  $b = 0,5$  vzhledem k minimálním ztrátám. Pokud provedeme příslušné nahrazení, dostaneme rovnici ve tvaru:

$$Q_{Ni} = 2,52 \cdot 10^2 \cdot K_v \cdot \frac{p_1}{2} \sqrt{1 - \left( \frac{r - b}{1 - b} \right)^2} \quad (3)$$

Pokud uvažujeme podkritické proudění bude vždy platit  $r > b$  a výraz pod odmocninou označím  $a$ .

$$a = \sqrt{1 - \left( \frac{r - b}{1 - b} \right)^2} \quad (4)$$

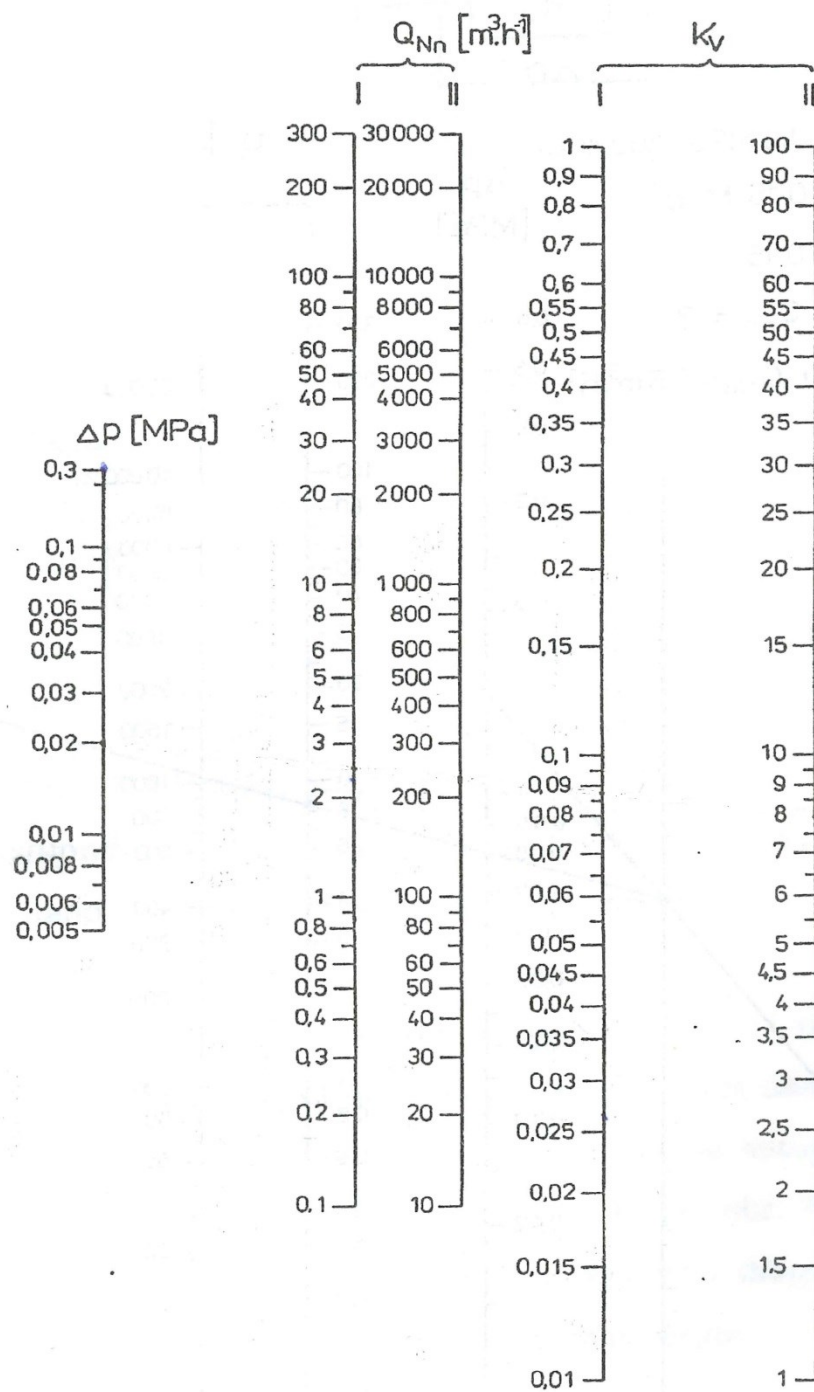
a pro výpočty lze použít diagram funkční závislosti  $a(r, b)$  na Obr.10 [1].



Obr. 10 Výpočtový diagram [1]

Pro výpočet průtoku  $Q_{Ni}$  podle výše uvedených rovnic (1) (2) (3) je ještě nutné znát součinitele  $K_v$ , tento součinitel získáme z nomogramu na Obr. 11.



Obr. 11 Nomogram pro výpočet součinitele  $K_v$  [1]

## 5.2 Postup výpočtu a měření podle SMC

V této kapitole je popsán způsob výpočtu a měření podle firmy SMC. Je zde uveden způsob jak zvolit vhodnou metodu, jak provést výpočet a jakým způsobem zapojit testovací obvod.

### Určení průtokových charakteristik

V této části je popsána volba vhodného označení, které vychází z předepsaných norem a následné vysvětlení jednotlivých označení. Určení průtokových charakteristik pneumatických prvků je závislé na *Tab. č.3*.

*Tab. č. 3 Určení průtokových charakteristik [8]*

Odpovídající zařízení	Označení dle mezinárodní normy	Další označení	Standardy vyhovující normám
Zařízení pro pneumatiku	C,b	-	ISO 6358: 1989 JIS B 8390: 2000
		S	JIS B 8390: 2000 Vybavení: JIS B 8373, 8374, 8375, 8379, 8381
	-	Cv	ANSI/(NFPA)T3.21.3: 1990

Zařízení pro pneumatiku

Označení (*C*, *b*) vychází ze standardů dle norem:

ISO 6358: 1989 energie pneumatické tekutiny—Komponenty využívající stlačitelné tekutiny— Stanovení průtokových charakteristik

JIS B 8390: 2000 : energie pneumatické tekutiny— Komponenty využívající stlačitelné tekutiny —Jak zjišťovat průtokové charakteristiky [8].

### Definice průtokových charakteristik

Průtokové charakteristiky jsou uvedeny jako výsledek porovnání mezi zvukovou vodivostí *C* a kritickým poměrem tlaků *b*.

Zvuková vodivost  $C$ : Je to maximální kapacita průtoku jakéhokoliv pneumatického prvku. Dosažení maximální kapacity nastane, když procházející tekutina dosáhne nadkritického proudění.

Poměr kritického tlaku  $b$ : Je to tlakový poměr při kterém se mění typ proudění v prvku.

Škrčený průtok: Je to průtok, při kterém je vstupní tlak větší než výstupní tlak a kde je dosaženo rychlosti zvuku v určité části prvku. Hmotnostní průtok je úměrný vstupnímu tlaku a není závislý na výstupním tlaku.

Podzvukové proudění: Proudění, které je větší než kritický poměr tlaků.

Normální podmínky: Vzduch o teplotě 20 °C, absolutní tlak 0.1 MPa (= 100 kPa = 1 bar), relativní vlhkost 65%.

Standardy odpovídající těmto normám: ISO 8778: 1990 Energie pneumatické tekutiny—Standardní reference

JIS B 8393: 2000: Energie pneumatické tekutiny —Standardy v normální atmosféře [8].

### Rovnice průtoku

V této části je popsán způsob jak vybrat vhodnou rovnici pro výpočet průtoku. Může být vyjádřena následovně:

Pokud  $\frac{p_2+0.1}{p_1+0.1} \leq b$ , škrčený průtok potom platí rovnice

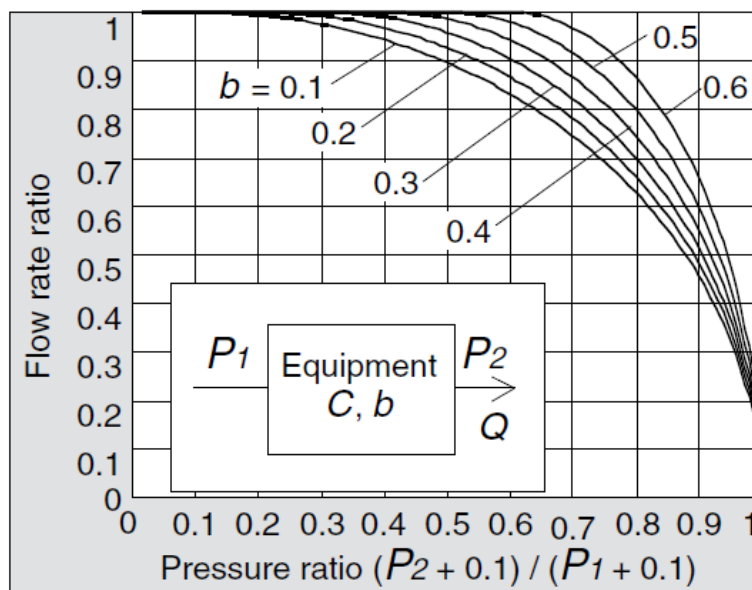
$$Q = 600 \cdot C(p_1 + 0.1) \sqrt{\frac{293}{273 + t}} \quad (5)$$

Pokud  $\frac{p_2+0.1}{p_1+0.1} > b$ , podzvuková rychlost proudění potom platí rovnice

$$Q = 600 \cdot C(p_1 + 0.1) \sqrt{1 - \left[ \frac{\frac{p_2+0.1}{p_1+0.1} - b}{1 - b} \right]^2} \cdot \sqrt{\frac{293}{273 + t}} \quad (6)$$

$Q$  = Průtok vzduchu [dm<sup>3</sup>/min],  $C$  = Zvuková vodivost [dm<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.bar<sup>-1</sup>],  $b$  = kritický tlakový poměr [—],  $p_1$  = vstupní tlak [MPa],  $p_2$  = výstupní tlak [MPa],  $t$  = teplota [°C]

Křivka průtokové charakteristiky je znázorněna na *obr. 12*, pro více detailů je dobré použít program od SMC “Energy Saving Program“ [5] [8].

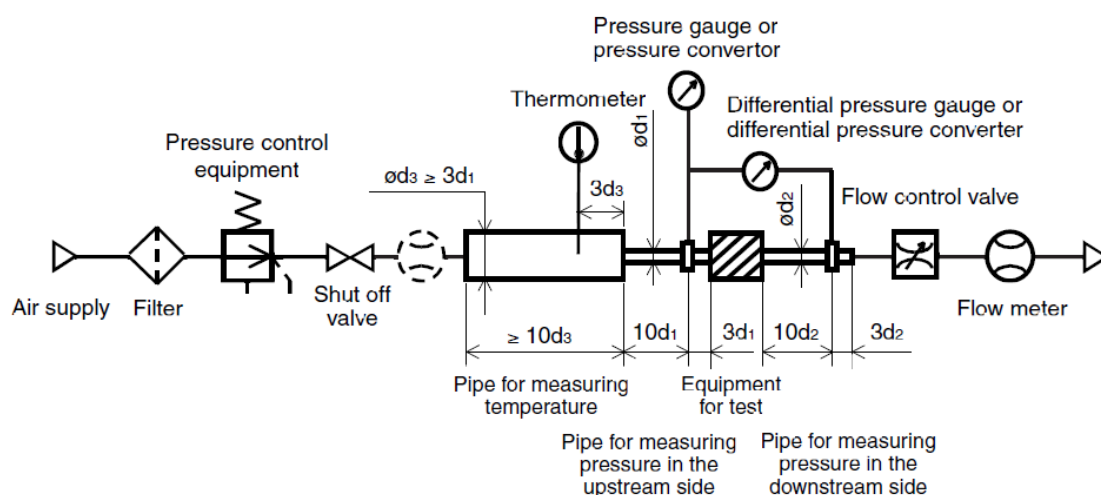


*Obr. 12 Závislost poměru průtoků na tlakovém poměru [8]*

### Testovací metoda

Dále je popsán postup při testování prvků, tato metoda používá škrcení průtoku při testování.

Zapojíme měřicí obvod uvedený na *Obr. 13*. Nastavíme minimální vstupní tlak, který nesmí klesnout pod 0,3 MPa a změříme maximální průtok. Následně uzavíráme škrticí ventil a regulujeme průtok na 80%, 60%, 40%, 20% a zároveň měříme vstupní a výstupní tlak, potom získáme zvukovou vodivost  $C$  z maximálního průtoky. Kromě toho vyneseme získaná data do vzorce podzvukového proudění, abychom našli  $b$ , to získáme odečtením  $b$  od průměrné hodnoty [8].



Obr. 13 Zapojení měřicí trati podle SMC [8]

### Měření rozváděče

Z této kapitoly jsem vycházel při měření rozváděče v mé práci. Popisuje se zde výpočet poměrného průřezu  $S$ , který je směrodatný, jelikož se dá pomocí diagramu na Obr. 15 převést na koeficienty, které uvádí jiní výrobci, a tudíž lze porovnat s katalogovými hodnotami.

Poměrný průřez  $S$

Standards, které odpovídají normám:

JIS B 8390: 2000: Energie pneumatické kapaliny-prvky používající stlačitelné kapaliny – stanovení průtokových charakteristik

Vybavení odpovídající normám: JIS B 8373: 2 cestný elektromagneticky ovládaný pneumatický rozváděč

JIS B 8374: 3 cestný elektromagneticky ovládaný pneumatický rozváděč

JIS B 8375: 4 a 5-ti cestný elektromagneticky ovládaný pneumatický rozváděč

JIS B 8379: pneumatické tlumiče

JIS B 8381: pneumatické šroubení

Definice průtokových charakteristik:

Poměrný průřez  $S$ : Je plocha ideálního škrticího ventilu bez uvažování tření, odvozená z tlakových změn ve vzdušníku, nebo při vyprazdňování stlačeného vzduchu ze vzdušníku bez redukce průtoku [8].

Rovnice průtoku:

Pokud  $\frac{p_2+0,1}{p_1+0,1} \leq 0,5$  jedná se o škrcený průtok a rovnice průtoku bude

$$Q = 120 \cdot S(p_1 + 0,1) \sqrt{\frac{293}{273 + t}} \quad (7)$$

Pokud  $\frac{p_2+0,1}{p_1+0,1} > 0,5$  jedná se o podzvukový průtok a rovnice průtoku bude

$$Q = 240 \cdot S \sqrt{(p_2 + 0,1)(p_1 - p_2)} \sqrt{\frac{293}{273 + t}} \quad (8)$$

Převod na zvukovou vodivost  $C$ :

$$S = 5,0 \cdot C$$

$Q$ : Průtok vzduchu [ $\text{dm}^3/\text{min}$ ],  $S$ : Poměrný průřez [ $\text{mm}^2$ ],  $p_1$ : Vstupní tlak [ $\text{MPa}$ ],  $p_2$ : Výstupní tlak [ $\text{MPa}$ ],  $t$ : Teplota [ $^\circ\text{C}$ ]

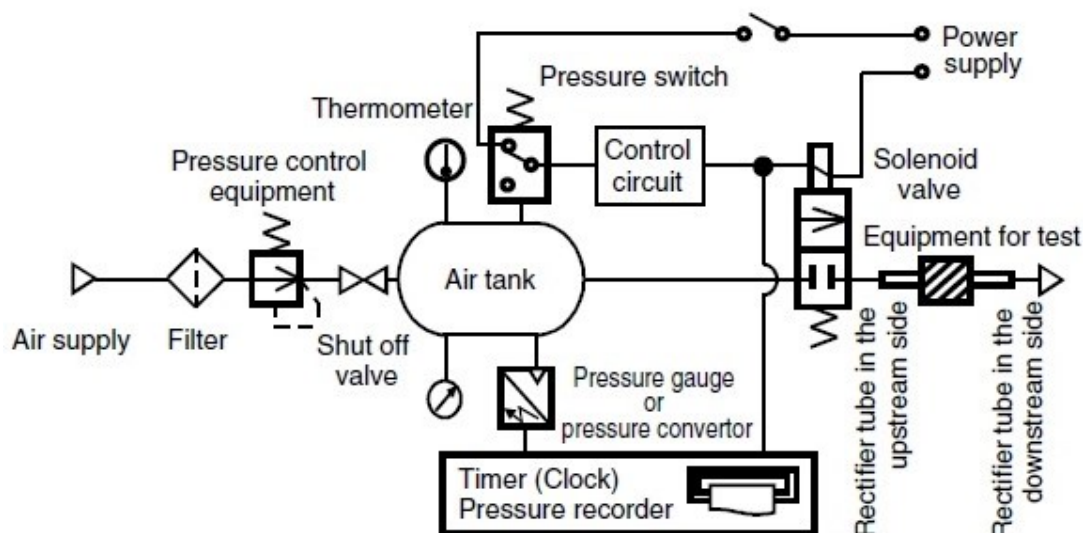
Poznámka: Rovnice pro podzvukovou rychlost (8) je možno aplikovat jen když neznáme kritický tlakový poměr  $b$ . V rovnici pro zvukovou vodivost  $C$  (6) je to ta samá rovnice jako při hodnotě  $b = 0,5$  [8].

#### Testovací metoda

Zapojíme měřicí obvod uvedený na *Obr. 14*. Vypouštíme stlačený vzduch ze vzdušníku do atmosféry, dokud tlak ve vzdušníku neklesne pod 0,25 MPa, vzdušník musí být natlakovaný na určitý tlak, který neklesne pod 0,6 MPa. Jakmile vypouštíme stlačený vzduch měříme čas, za který tlak ve vzdušníku klesne na hodnotu 0,25 MPa, potom vypočítáme poměrný průřez  $S$  z rovnice (9). Objem vzdušníku by měl být volen v určitém rozsahu, odpovídající poměrnému průřezu testovacího prvku [8].

$$S = 12,1 \frac{V}{t} \log_{10} \left( \frac{p_s + 0,1}{p + 0,1} \right) \sqrt{\frac{293}{T}} \quad (9)$$

S: Poměrný průřez [mm<sup>2</sup>], V: Objem vzdušníku [dm<sup>3</sup>], t: Čas vypouštění [s], p<sub>s</sub>: Tlak ve vzdušníku před vypuštěním [MPa], p: Tlak ve vzdušníku po vypuštění [MPa], T: Teplota ve vzdušníku před vypuštěním [K]



Obr. 14 Testovací trať podle JIS B 8390 v katalogu SMC

Diagram pro přepočet mezi koeficienty

Tyto koeficienty se využívají k vyjádření objemu vzduchu, který proteče daným prvkem. Každá firma používá pro vyjádření průtoku různé koeficienty. Na níže uvedeném diagramu na Obr. 15. jsou ukázány jednotlivé faktory a násobné hodnoty mezi těmito faktory [9].

kv – faktor

Je to metrický údaj udávaný v normálních litrech za minutu [l<sub>n</sub>/min]. Tento údaj je přiřazen měřením, která se provádí s vodou o teplotě 5 – 30 °C. Faktor kv se rovná jedné pokud při tlakové ztrátě jednoho baru proteče ventilem jeden litr vody za minutu o teplotě 4°C. Faktory Kv ,kv, Cv a f slouží k porovnávání.

Kv – faktor

Tento faktor je shodný s faktorem kv, ale průtok se vyjadřuje v [m<sup>3</sup>/h].

$C_v$  – faktor

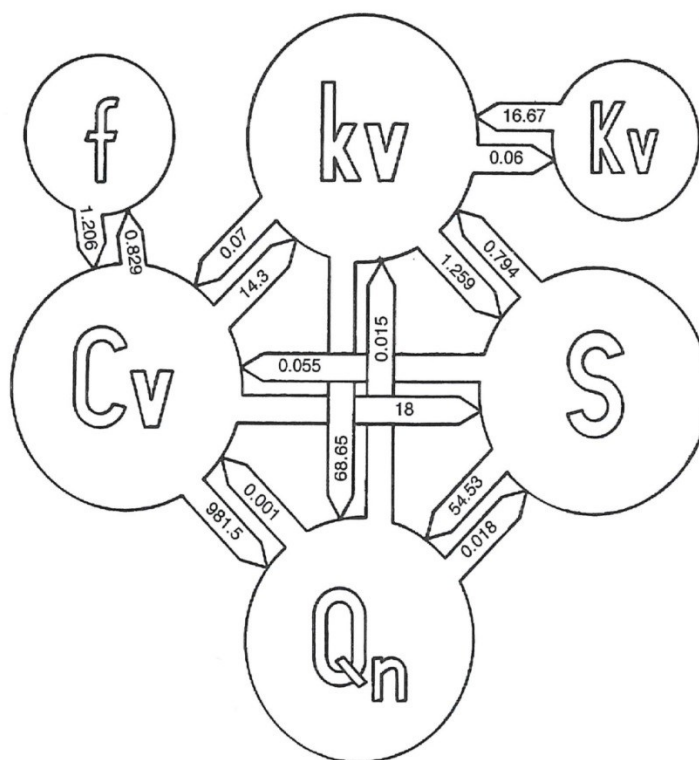
Analogie výše uvedeným faktorům s tím rozdílem že je vyjádřen v anglosaských jednotkách. Údaje se vztahují k průtoku jednoho amerického galonu vody za minutu při tlakové ztrátě jednoho psi a o teplotě 60 °F.

$f$  – faktor

Tento faktor se používá při měření za stejných podmínek jako  $C_v$  – faktor s průtokem jednoho britského galonu

Poměrný průřez  $S$  [mm<sup>2</sup>]

Poměrný průřez je údaj, který byl získán z měření průtoku vzduchu. Zastupuje ventil nebo soustavu prvků, jako plochu otvoru měřicí clonky, kterou proteče daný objem vzduchu.

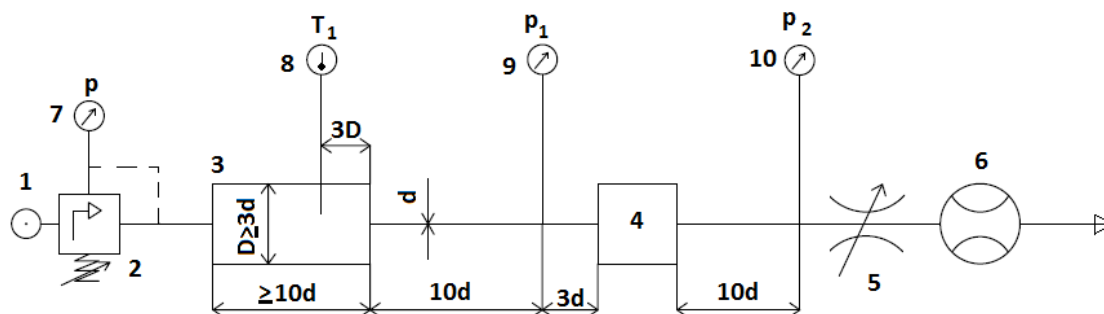


Obr. 15 Násobné koeficienty pro jednotky průtoku [9]



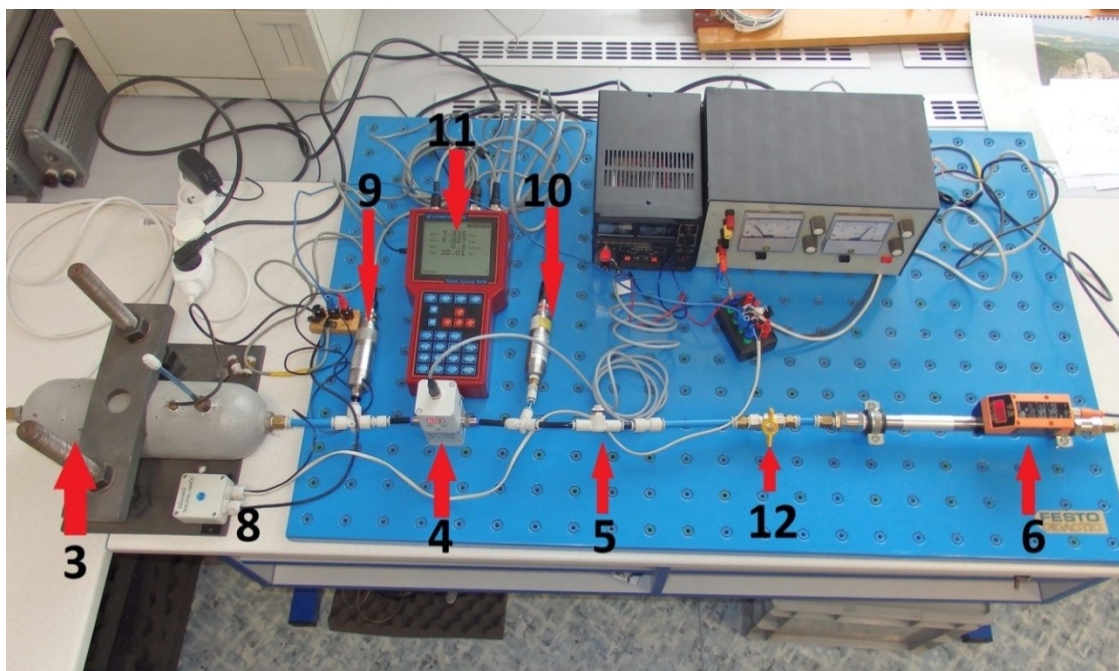
## 6. Návrh měřicí trati

Při navrhování měřicí trati *Obr. 16* pro měření průtočných pneumatických prvků jsem vycházel z normy ISO 6358. Musel jsem také brát ohled na to, jaké prvky jsou na naší katedře k dispozici. Pomocí teorie jsem nejdříve zjistil, které veličiny budu muset měřit, aby bylo možné vypracovat potřebné charakteristiky. Budu měřit vstupní tlak  $p_1$ , výstupní tlak  $p_2$  teplotu  $T$  a objemový průtok  $Q$ . Poloha snímačů tlaku vychází z metodiky měření, protože jsem potřeboval měřit tlak před a za zkoumaným prvkem. Snímač průtoků jsem umístil nakonec trati vzhledem k typu průtokoměru. Snímač teploty jsem umístil na začátku trati. Schéma měřicí tratě je zobrazeno níže [1] [7].



*Obr. 16 Návrh měřicí tratě podle ISO 6358*

1 - zdroj stlačeného vzduchu, 2 - redukční ventil, 3 - vzdušník, 4 - měřený prvek, 5 - škrticí ventil, 6 - průtokoměr, 7 - kontrolní manometr, 8 - teploměr, 9 - manometr pro měření vstupního tlaku, 10 - manometr pro měření výstupního tlaku  $d$  - světlost potrubí,  $D$  - průměr vzdušníku



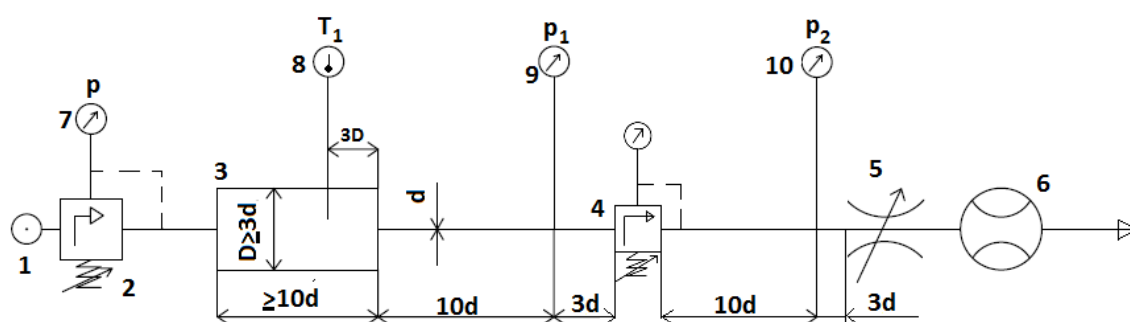
Obr. 17 Fotografie zapojení dle schématu Obr. 16

3 vzdušník , 4 - měřený prvek, 5 - škrticí ventil, 6 - průtokoměr, 8 - teploměr, 9 - snímač vstupního tlaku, 10 - snímač výstupního tlaku, 11- měřicí přístroj Hydrotechnik 5050, 12- kulový ventil

Vzhledem k rozmístění prvků měřicí tratě Obr. 17 v laboratoři, není na fotografii zdroj stlačeného vzduchu 1 a redukční ventil 2 s kontrolním manometrem 7.

## 6.1 Popis metodiky měření redukčního ventilu

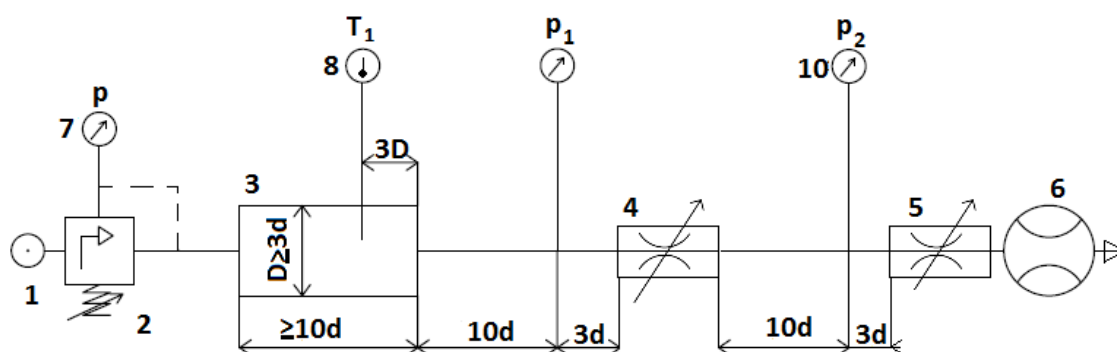
Měřicí trať pro redukční ventil je znázorněna na Obr. 18. Za zdrojem stlačeného vzduchu 1 je umístěn redukční ventil 2, kterým nastavujeme konstantní tlak  $p_1$  na vstupu měřeného redukčního ventilu 4. Na měřeném redukčním ventilu nastavíme buď tlak stejný jako je na vstupu, nebo tlak menší. Měření probíhá tak že postupně otevíráme škrticí ventil 5 a tím dochází ke změnám tlaku a průtoku, zároveň také musím regulovat vstupní tlak redukčním ventilem. Průtok a teplota je snímána stejně jako v minulých měřeních. Vzdálenosti umístění snímačů vychází z normy ISO 6358 [7].



Obr. 18 Měřicí trať pro redukční ventil

1 - zdroj stlačeného vzduchu, 2 - redukční ventil, 3 - vzdušník, 4 - měřený redukční ventil, 5 - škrticí ventil, 6 - průtokoměr, 7 - kontrolní manometr, 8 - teploměr, 9 - vstupní tlak, 10 - výstupní tlak  $d$  - světlost potrubí,  $D$  - průměr vzdušníku

## 6.2 Popis metodiky měření škrticího ventilu



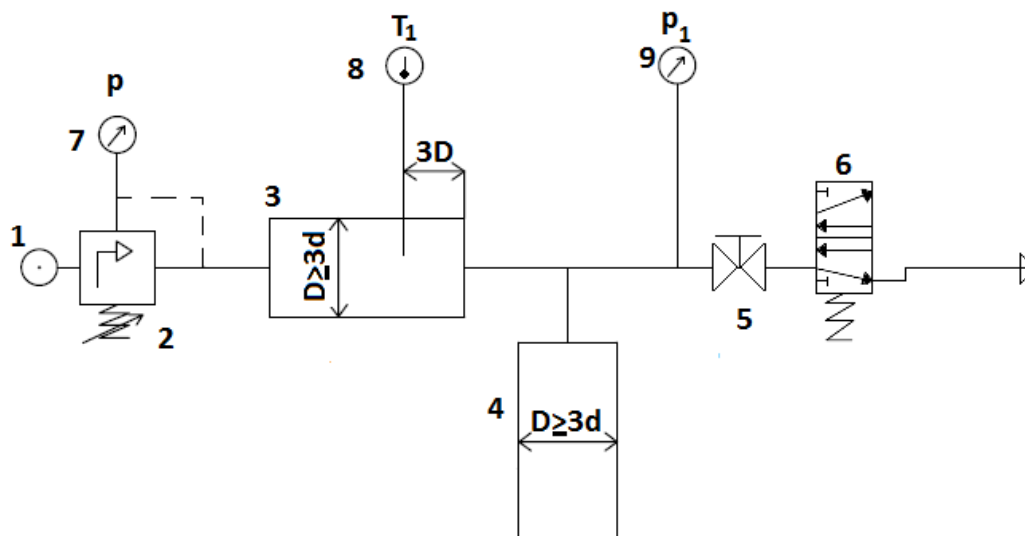
Obr. 19 Měřicí trať pro škrticí ventil

1 - zdroj stlačeného vzduchu, 2 - redukční ventil, 3 - vzdušník, 4 - měřený škrticí ventil, 5 - škrticí ventil, 6 - průtokoměr, 7 - kontrolní manometr, 8 - teploměr, 9 - vstupní tlak, 10 - výstupní tlak

Zapojení škrticího ventilu je zobrazeno na Obr. 19. Za zdrojem stlačeného vzduchu 1 je opět umístěn redukční ventil 2, kterým se nastavuje a také reguluje

konstantní tlak  $p_1$  na vstupu do měřeného prvku 4, kterým je škrticí ventil a je na začátku zcela uzavřen. Měřený škrticí ventil otevřeme na určitý počet otáček a zahájíme měření. Postupným otevíráním škrticího ventilu 5 určitými otáčkami nám narůstá i výstupní tlak  $p_2$  a průtok  $Q$  měřený průtokoměrem 6. Vzdálenosti umístění snímačů vychází jako u předchozího měření z normy ISO 6358 [1] [7] [8].

### 6.3 Popis metodiky měření 5/2 rozváděče



Obr. 20 Měřicí trať pro rozváděč 5/2

1 - zdroj stlačeného vzduchu, 2 - redukční ventil, 3 - vzdušník, 4 - vzdušník, 5 - kulový ventil, 6 - měřený rozváděč, 7 - kontrolní manometr, 8 - teploměr, 9 - vstupní tlak,

Měření 5/2 rozváděče je zobrazeno na Obr. 20, za zdrojem stlačeného vzduchu 1 je umístěn redukční ventil 2, kterým nastavíme vstupní tlak do rozváděče 6. Kulový ventil 5 otevřeme na plný průtok a měříme dobu vypouštění vzdušníků 3 a 4.

Zapojení je provedeno pouze v jednom směru, zpětná větev je zaslepena. Během měření rozváděč nepřestavuju. Rozložení prvků na schématu je dle normy JIS B8390.

## 7. Přehled použitých prvků a snímačů

Zde je uveden seznam měřených prvků a měřicích zařízení, které jsem použil při realizaci měření. U jednotlivých prvků jsou uvedeny základní parametry.

### 7.1 Přehled měřených prvků

Redukční ventil Festo – VPPE 3-1-1/8-10



*Obr. 21 Redukční ventil Festo VPPE*

Redukční ventil Festo – VPPE 3-1-1/8-10 Obr. 21 je nepřímě řízený membránový 3 cestný elektricky ovládaný ventil. Návrat do základní polohy zajišťuje mechanická pružina. Ventil je řízený prostřednictvím ventilů 2/2. Jmenovitá světlost na přívodu je 5 mm a na odvětrávání 2,5 mm. Regulační rozsah tohoto ventilu je 0,01 – 1 MPa a je schopný provozu při teplotě okolí 0 – 60 °C a teplotě média 10 – 50 °C. Nastavený tlak nám ukazuje display a směr průtoku média naznačuje šipka [10].

## Škrticí ventil AS300 1F

*Obr. 22 Škrticí ventil*

Škrticí ventil AS300 1F Obr.22 je jednoduchý regulátor průtoku. Škrčení vzduchu probíhá v jednom směru a je realizováno pomocí škrticího šroubu. Rozsah použití ventilu je 0,1 – 10 MPa. Provozní teplota je -5 až 60 °C. Jmenovitá světlost je 10 mm [11].

## Rozváděč 5/2 SMC SYA3120 – M5

*Obr. 23 Rozváděč 5/2*



Rozváděč 5/2 od firmy SMC *Obr.23* je pěticestný dvoupolohový průtočný prvek. Slouží k ovládání směru průtoku v pneumatickém systému. Pracovní rozsah tohoto rozváděče je 0,15 – 0,7 MPa a dokáže pracovat v rozsahu teplot okolí a média -10 až 60 °C. Jmenovitý průtok je 171 l/min [12].

## 7.2 Přehled měřicích zařízení

Tlakový senzor Hydrotechnik PR 15

Pro měření tlaku jsem použil snímač od firmy Hydrotechnik *Obr.24*. Tento snímač měří v rozsahu -0,1 až -0,6 MPa a má analogový výstupní signál 4 – 20 mA s přesností  $\pm 0,5 \%$  [13].



*Obr. 24 Snímač tlaku*

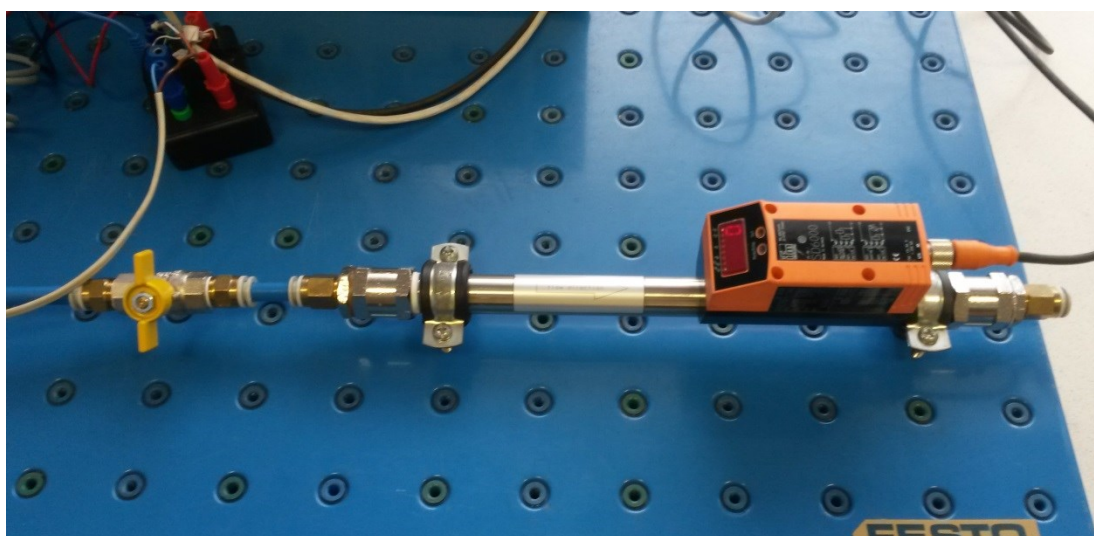
Převodník teplota – napětí Sensit STU – Ni IP65

Tento převodník zobrazen na *Obr. 25* je určený k převodu signálu snímačů teploty na unifikovaný signál 0 – 10 V. Veškerá elektronika je uvnitř plastové krabičky, z ní vede připojovací kabel pro připojení zařízení a teplotní čidlo. Převodník lze použít pro všechny řídicí systémy, které jsou kompatibilní s napětovým vstupem 0÷10 V. Měřicí rozsah tohoto zařízení je 0 ÷ 100 °C [13].



*Obr. 25 Převodník teplota - napětí*

Průtokoměr SD 6000



*Obr. 26 Průtokoměr SD 6000*

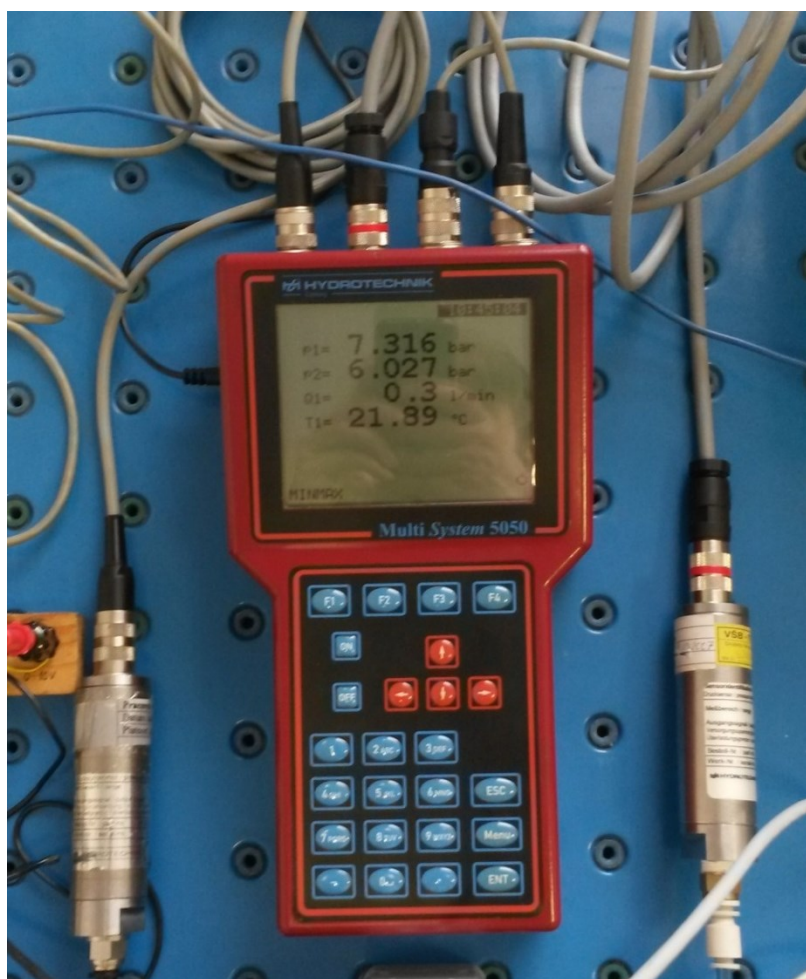
Pro měření průtoku vzduchu jsem použil průtokoměr SD 6000 *Obr. 26*. Průtokoměr měří v rozsahu 10 – 1250 l/min v krocích 1 l/min. Napájecí napětí průtokoměru je 20÷30 V, proudový odběr <250 mA, analogový výstup 4÷20 mA. Reakční doba průtokoměru je 0,1 s a tlaková pevnost 1600 kPa. Měří v teplotním rozsahu 0 – 60 °C. Průtokoměr již ukazuje přepočtený průtok na normální podmínky, konkrétně při tlaku  $p = 101325 \text{ Pa}$  a teplotě  $T = 15 \text{ °C}$  [7].



## Měřicí zařízení M5050 Hydrotechnik

Měřicí zařízení Hydrotechnik M5050 *Obr. 27* se řadí mezi univerzální přístroje pro snímání veličin s elektrickým výstupním signálem. Pomocí tohoto přístroje lze měřit několik veličin, např. tlak, teplota, průtok, moment a další. Lze měřit až 6 veličin najednou, to znamená, že lze připojit až 6 snímačů najednou. Přístroj disponuje dohromady čtyřmi analogovým a dvěma frekvenčními vstupy. Analogové vstupy jsou tyto  $I = (0 \div 20)$  mA,  $(4 \div 20)$  mA, napěťový  $U = (0 \div 10)$  V. Přístroj Hydrotechnik lze napájet buď externě ze sítě anebo pomocí akumulátoru. Snímače jsou napájeny z přístroje.

Naměřené hodnoty lze odečítat z displeje anebo je můžeme ukládat do paměti. Přístrojem M5050 Hydrotechnik můžeme měřit časově stálé veličiny a také rychlé změny v čase. Pomocí vnitřní paměti můžeme z naměřených hodnot snadno udělat průměrnou hodnotu. Nejkratší interval snímání je 1 ms [13].



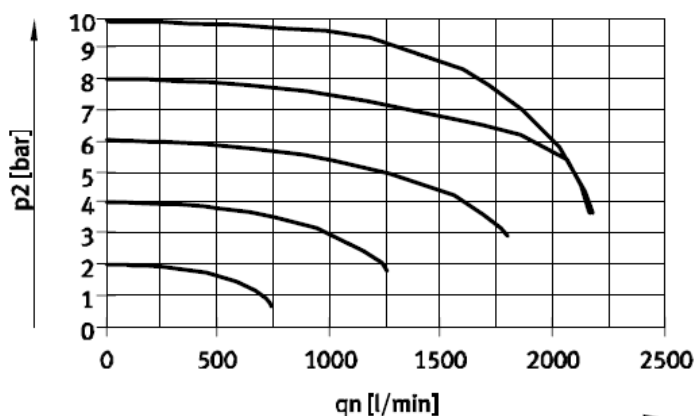
*Obr. 27 měřicí zařízení Hydrotechnik 5050*

## 8. Měření charakteristik jednotlivých prvků

V této kapitole je popsána realizace měření pro redukční ventil, škrticí ventil a rozváděč. Jsou zde uvedeny základní parametry prvků a fotografie zapojení jednotlivých prvků v měřicí trati. Jsou zde také uvedeny katalogové hodnoty, se kterými porovnávám hodnoty naměřené.

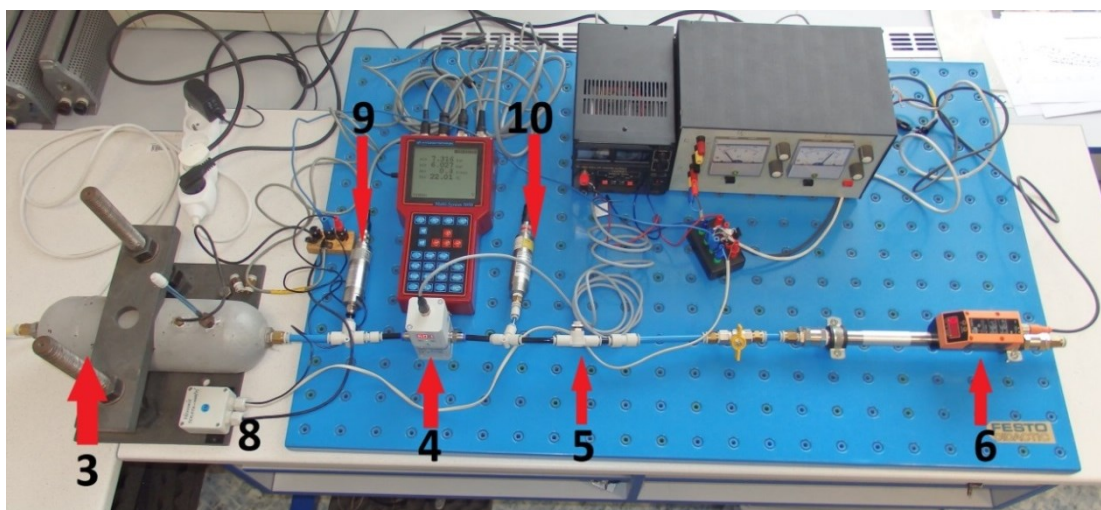
### 8.1 Realizace měření pro redukční ventil

Jako první měřený prvek jsem použil redukční ventil VPPE-3-1-1/8-10-010-E1 firmy Festo. Regulační rozsah tohoto ventilu je 0,01 – 1 MPa a je schopný provozu při teplotě okolí 0 – 60 °C a teplotě média 10 – 50 °C [10]. Podrobnější specifikace jsou v kapitole 7.1.



Obr. 28 charakteristika redukčního ventilu Festo [10]

Způsob měření tohoto prvku je popsán v kapitole 6.1. Zapojení redukčního ventilu do měřicí trati je na Obr. 29.



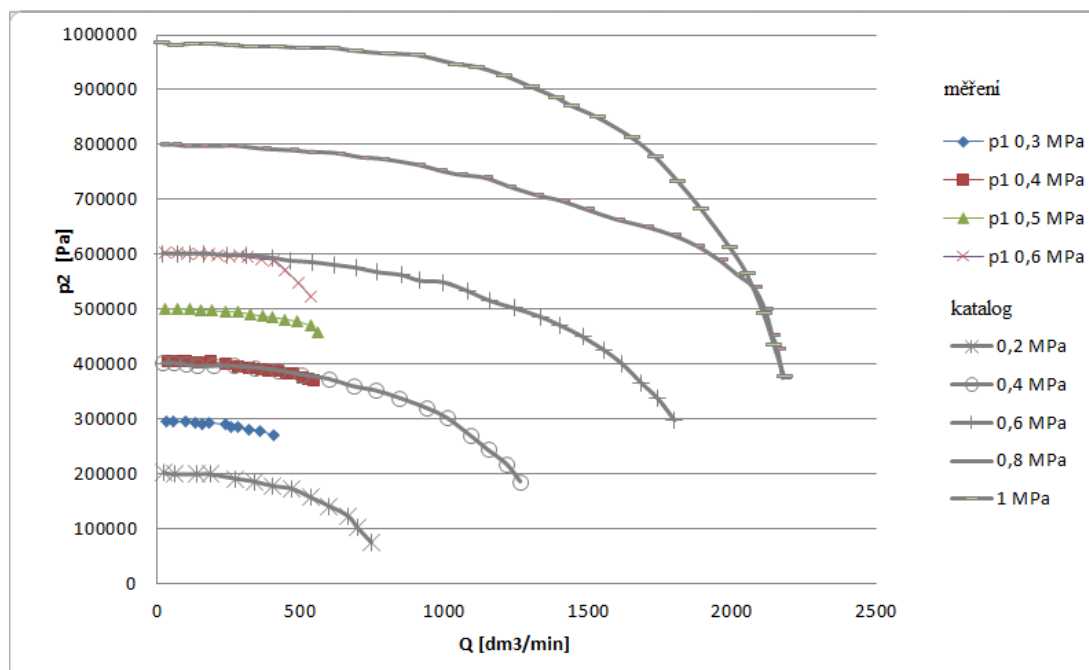
*Obr. 29 Zapojení redukčního ventilu*

*3 vzdušník , 4 - měřený redukční ventil, 5 - škrticí ventil, 6 - průtokoměr, 8 - teploměr, 9 - vstupní tlak, 10 - výstupní tlak*

Redukční ventil jsem měřil pro 4 různá nastavení a to 0,3 MPa, 0,4 MPa, 0,5 MPa a 0,6 MPa. Naměřená data jsem vynesl do tabulek, které jsou uvedeny v příloze č.1 a poté jsem vytvořil výslednou charakteristiku. Rozdíl tlaků jsem počítal podle rovnice  $\Delta p = p_1 - p_2$

Naměřené charakteristiky se svým průběhem shodují s charakteristikami od výrobce. Vzhledem k podmínkám v laboratoři pneumatických mechanismů nebylo možné ověřit vlastnosti redukčního ventilu v celém rozsahu průtoku. Měření při tlaku  $p_1 = 0,6 \text{ MPa}$  bylo ovlivněno systémem před měřicí trátí a nedostatečnou propustností.

Výsledná charakteristika se shoduje s charakteristikou výrobce a je uvedena Obr.30.

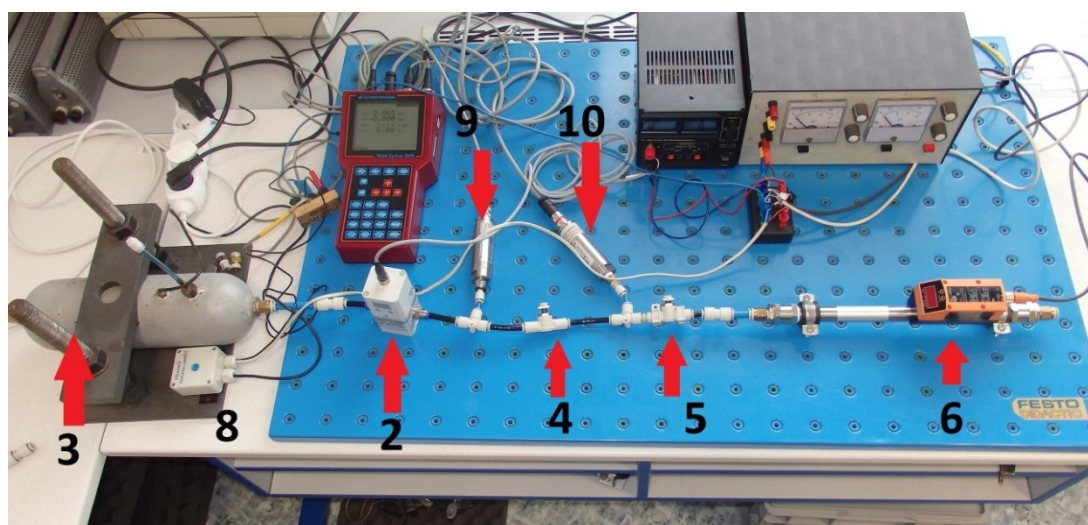


Obr. 30 Výsledná charakteristika redukčního ventilu

## 8.2 Realizace měření pro škrticí ventil

Dalším zkoumaným prvkem byl škrticí ventil AS 3001F. Rozsah použití ventilu je 0,1 – 10 MPa. Provozní teplota je -5 až 60 °C. Jmenovitá světlost je 10 mm [11]. Podrobnější specifikace jsou v kapitole 7.1.

Způsob měření tohoto prvku je popsán v kapitole 6.2. Zapojení škrticího ventilu do měřicí trati je ukázáno na Obr. 31.

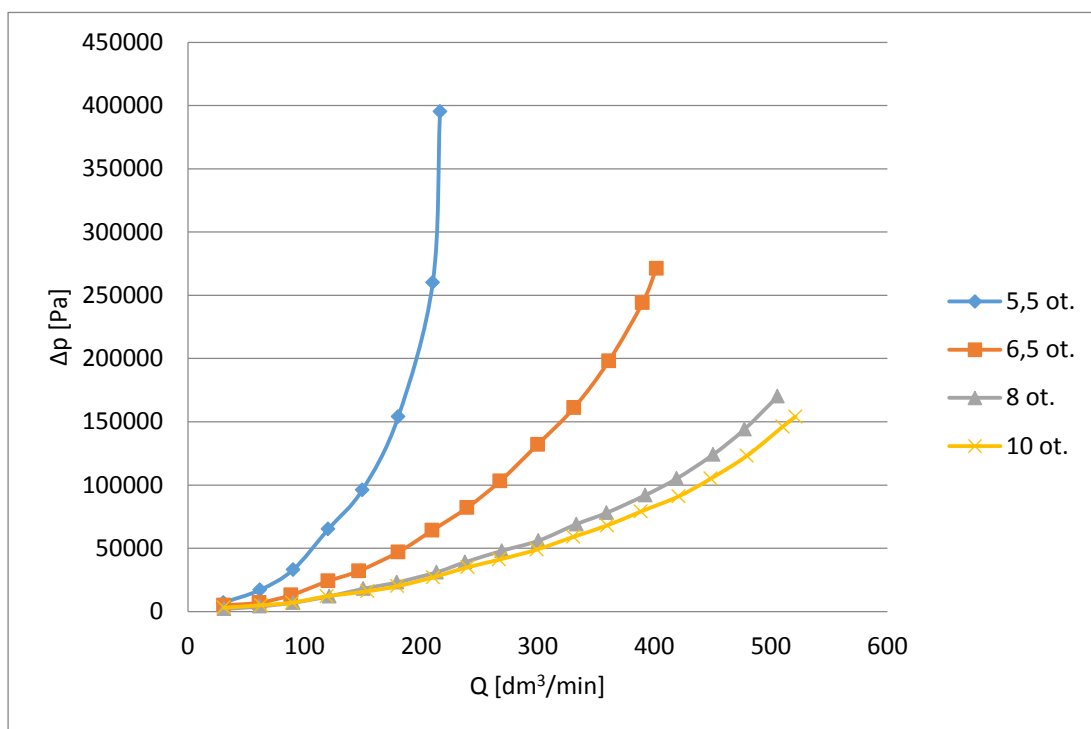


Obr. 31 Zapojení škrticího ventilu do měřicí trati

2 – redukční ventil, 3 vzdušník, 4 – měřený škrticí ventil, 5 – škrticí ventil, 6 – průtokoměr, 8 – teploměr, 9 – vstupní tlak, 10 – výstupní tlak

Škrticí ventil jsem měřil pro 4 různá nastavení otáček a to nastaven na 5,5 otáček, 6,5 otáček, 8 a 10 otáček. Naměřená data jsem zapsal do tabulek, která jsou v příloze č. 2 a následně jsem vytvořil charakteristiku závislosti průtoku na rozdílu tlaků Obr. 32, kterou bych považoval za ekvivalentní k charakteristice na obr. 6.

Vzhledem k tomu že výrobce neuvádí charakteristiku tohoto ventilu v katalogu tak jsem ji neměl s čím porovnat, ovšem podle vizuálního porovnání s charakteristikou na obr. 6 se dá usoudit, že škrticí ventil má správnou průtokovou propustnost při daném nastavení.



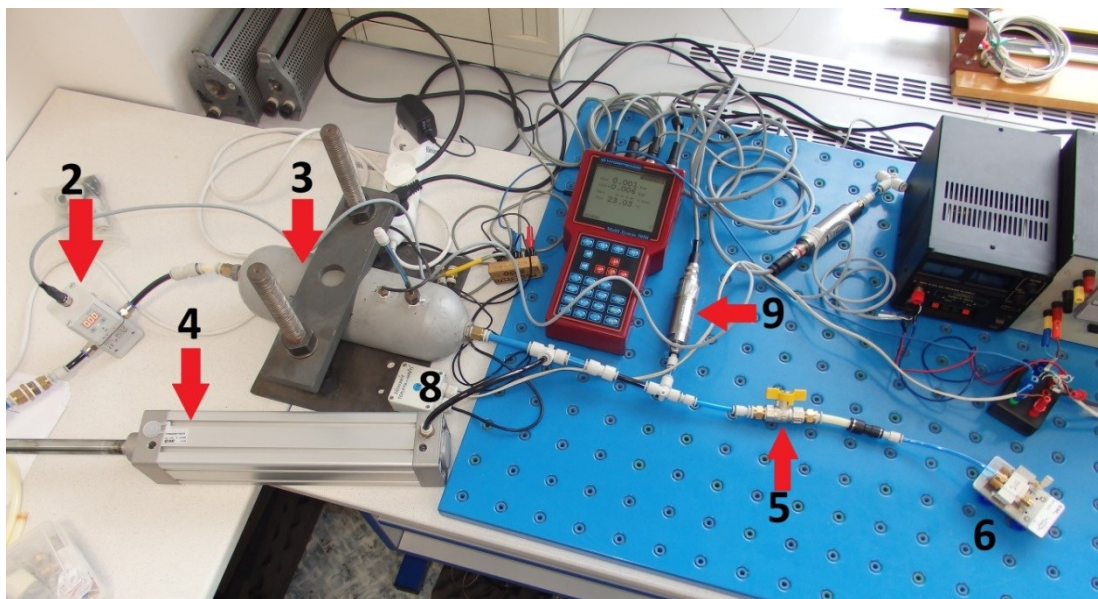
Obr. 32 Výsledná charakteristika škrticího ventilu

### 8.3 Realizace měření pro rozváděč

Posledním měřeným prvkem byl rozváděč 5/2 SMC SYA3120 – M5. Pracovní rozsah tohoto rozváděče je 0,15 – 0,7 MPa a dokáže pracovat v rozsahu teplot okolí a média -10 až 60 °C. Jmenovitý průtok je 171 l/min [12]. Podrobnější specifikace jsou v kapitole 7.1.



Způsob měření tohoto prvku je popsán v kapitole 6.3. Zapojení rozváděče do měřicí trati je ukázáno na *Obr. 33*. Pro měření rozváděče byl do měřicí trati přidán ještě jeden vzdušník pro odpovídající kapacitu.



*Obr. 33 Zapojení rozváděče do měřicí trati*

2 – redukční ventil, 3,4 vzdušník, 5- kulový ventil, 6-měřený rozváděč, 8 -  
teploměr, 9 - vstupní tlak

#### Parametry obvodu

objem 1. vzdušníku			objem 2. vzdušníku			celkový objem		
V	779311,3	mm <sup>3</sup>	V	2	dm <sup>3</sup>	V	2,779311	dm <sup>3</sup>
	0,779311	dm <sup>3</sup>						

#### Hodnoty měření

1. měření			2. měření			3. měření		
p <sub>s</sub>	0,6	[MPa]	p <sub>s</sub>	0,6	[MPa]	p <sub>s</sub>	0,6	[MPa]
p	0,25	[MPa]	p	0,25	[MPa]	p	0,25	[MPa]
t	5,15	[s]	t	3,85	[s]	t	3,8	[s]
T	27	[°C]	T	26,2	[°C]	T	25,8	[°C]
T	300,15	[K]	T	299,35	[K]	T	298,95	[K]

Celkově proběhla tři měření. První měření bych považoval pouze za testovací. Zbýlá dvě měření uvažuji jako výsledná. Zpracování dat proběhlo v programu Hydrowin. Naměřená data jsem v programu převedl do textové formy následně

jsem načetl data v Excelu a podle testovací metody v kapitole 6.2 jsem odečetl hodnoty času vypouštění vzdušníku. Hodnota času byla měřena do tlaku 0,25 MPa. Potom jsem podle rovnice (9) vypočetl poměrný průřez S:

1. měření	kontrolní		2. měření			3. měření		
S	1,942181	[mm <sup>2</sup> ]	S	2,601452	[mm <sup>2</sup> ]	S	2,637444	[mm <sup>2</sup> ]

Výsledný poměrný průřez S určím jako střední hodnotu 2. a 3. měření.

S=	2,619448	[mm <sup>2</sup> ]
----	----------	--------------------

K porovnání s katalogovými hodnotami jsem využil diagram na *Obr. 15* a poměrný průřez jsem přepočítal na  $C_v$  faktor.

$$C_v = S \cdot 0,055 = 2,619 \cdot 0,055 = 0,144$$

Z katalogových hodnot *Obr. 34* můžeme vidět, že rozváděč, který jsem testoval má  $C_v$  faktor nižší, můžeme tedy usoudit, že funkčnost rozváděče není úplná, to může být způsobeno stářím a opotřebením prvku anebo to může být způsobeno nedostatečným objemem vzdušníku, kterým laboratoř disponuje.

#### Flow Characteristics/Weight

##### Model/Series SYA3□20 (Body ported)

Valve model	Type of actuation		Pilot port size (Nominal size)	Port size P, EA, EB    A, B		Flow characteristics								Weight (g)	
						1 → 4/2 (P → A/B)				4/2 → 5/3 (A/B → EA/EB)					
						C (dm³/(s·bar))	b	Cv	Q(l/min(ANR))*	C (dm³/(s·bar))	b	Cv	Q(l/min(ANR))*		
SYA3□20-M5	2 position	Single	M5	M5	C4 (One-touch fitting for ø4)	0.61	0.44	0.16	171	0.64	0.45	0.18	181	35	
		Double				0.48	0.46	0.13	137	0.47	0.43	0.13	131	37	
	3 position	Closed center				0.47	0.42	0.13	130	0.47 (0.44)	0.41 (0.37)	0.13 (0.12)	129 (117)	39	
		Exhaust center				0.50 (0.41)	0.48 (0.35)	0.15 (0.11)	145 (108)	0.47	0.43	0.13	131		
		Pressure center													
SYA3□20-C4	2 position	Single				C6 (One-touch fitting for ø6)	0.72	0.29	0.18	182	0.64	0.34	0.17	167	44
		Double					0.59	0.28	0.15	148	0.59	0.30	0.15	150	46
	3 position	Closed center					0.63	0.35	0.16	166	0.42 (0.41)	0.34 (0.37)	0.11 (0.11)	110 (109)	48
		Exhaust center					0.76 (0.46)	0.42 (0.34)	0.21 (0.12)	210 (120)	0.59	0.29	0.15	149	
		Pressure center													
SYA3□20-C6	2 position	Single			C6 (One-touch fitting for ø6)		0.76	0.30	0.19	193	0.65	0.39	0.17	176	40
		Double					0.76	0.55	0.24	233	0.60	0.33	0.16	156	42
	3 position	Closed center					0.65	0.32	0.16	167	0.64(0.42)	0.31 (0.36)	0.17 (0.11)	164 (111)	44
		Exhaust center					0.77 (0.49)	0.34 (0.43)	0.21 (0.15)	201 (136)	0.61	0.34	0.16	159	
		Pressure center													

*Obr. 34 Katalogové hodnoty pro rozváděč*

## 9. Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo zpracovat měření charakteristik pneumatických průtočných prvků. Dle zadání práce jsem měl provést popis měřených prvků, návrh měřicí tratě, zvolit vhodná měřidla, popsat a následně realizovat měření jednotlivých prvků a nakonec provést porovnání s katalogovými hodnotami. Má práce částečně navazuje na diplomovou práci, která se zabývala návrhem zkušebního zařízení pneumatických rotačních motorů, a tudíž jsem musel ověřit základní vlastnosti vybraných prvků z důvodu následného matematického modelování.

V teoretické části práce jsem nejprve zmínil úvod do problematiky zkoušení pneumatických prvků, popsal jsem měřené veličiny a způsoby měření jednotlivých veličin. Následně jsem určil, jaké prvky budu testovat a pomocí literatury jsem popsal teoretické charakteristiky jednotlivých prvků. Dále je uveden postup výpočtu a měření podle dvou různých zdrojů, v případě potřeby přepočtu na normální průtok a diagram s popisem průtokových koeficientů, které používají různí výrobci pneumatických prvků.

K realizaci měření bylo nutné udělat návrh měřicí tratě. Při navrhování měřicí trati pro měření redukčního ventilu Festo – VPPE 3-1-1/8-10 a škrticího ventilu AS300 1F jsem vycházel z normy ISO 6358, při navrhování měřicí trati pro měření rozváděče 5/2 SMC SYA3120 – M5 jsem vycházel z normy JIS B8390. Musel jsem také brát ohled na to, jaké prvky jsou na naší katedře k dispozici. Měření jednotlivých prvků proběhlo v laboratoři pneumatiky.

Závěrečná kapitola byla věnována zpracování a vyhodnocení naměřených dat a jejich následnému porovnání s údaji uvedenými v katalogích výrobců. Naměřené charakteristiky u redukčního ventilu Festo – VPPE 3-1-1/8-10 se svým průběhem shodují s charakteristikami od výrobce avšak u nastavení tlaku 0,6 MPa lze pozorovat při překročení hodnoty objemového průtoku  $450 \text{ dm}^3/\text{min}$  výrazný pokles oproti katalogovým hodnotám. Při hodnotě 0,5 MPa lze pozorovat obdobný průběh jako při nastavení 0,6 MPa avšak pokles po překročení  $450 \text{ dm}^3/\text{min}$  není až výrazný. Tento pokles je zapříčiněn nedostatečnou kapacitou stlačeného vzduchu, která byla při měření v laboratoři katedry k dispozici. Při vyšších hodnotách



průtoku můžeme měření označit za chybné, nicméně vlastnosti a funkce měřeného redukčního ventilu lze považovat za správné.

Naměřené charakteristiky u škrticího ventilu AS300 1F nebylo možné porovnat s katalogovými hodnotami, jelikož výrobce tyto charakteristiky neuvádí. Avšak průběhy naměřených hodnot jsem mohl porovnat s charakteristikou, kterou uvádí literatura a lze předpokládat, že škrticí ventil má správnou průtokovou propustnost při daném nastavení.

Jako poslední jsem provedl výpočet poměrného průřezu  $S$  u rozváděče 5/2 SMC SYA3120 – M5. Pomocí diagramu pro přepočet koeficientů jsem vypočítal  $C_v$  faktor a ten bylo možné porovnat s katalogovou hodnotou. Z katalogových hodnot lze vidět že  $C_v$  faktor u rozváděče, který jsem zkoumal je nižší, než jaký uvádí výrobce. To by mohlo být způsobeno opotřebením měřeného prvku, pro potvrzení tohoto tvrzení by musela být provedena další série měření, s delším časem vyprazdňování vzdušníku.

## 10. Literatura

- [1] KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy díl 1. – Pneumatické prvky a systémy*. Ostrava, VŠB-TUO, 1996. 267 s. 1. vydání. ISBN 80- 7078- 306-0
- [2] *Manometr*, INTERCOM Bohemia s.r.o, 2017, Dostupné z: <http://www.sagittarius.cz/cz/manometry-a-teplomery>
- [3] *Lopatkový průtokoměr*, Učební text, Dostupné z <http://publi.cz/books/177/01.html>
- [4] *Rotometr*, Automa - časopis pro automatizační techniku s.r.o, 2016 Dostupné z: [http://automa.cz/cz/web-clanky/plovackove-prutokomery-prutokomery-s-promenlivym-prurezem-0\\_9085](http://automa.cz/cz/web-clanky/plovackove-prutokomery-prutokomery-s-promenlivym-prurezem-0_9085)
- [5] BEATER, P. *Pneumatic Drives: System Design, Modeling and Control*. Berlín: Springer, 2007. 323 p. ISBN 978-3540-69470-0.
- [6] MURRENHOFF, H., REINERTZ, O. *Fundamentals of Fluid Power Part 2: Pneumatics*. Aachen: Shaker Verlag, 2014. 328 p. ISBN 978-3-8440-3213-0.
- [7] FOJTÁŠEK, K. *Experimentální zařízení pro měření odporů a charakteristik pneumatických průtočných prvků*. Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 2007, Vedoucí bakalářské práce DVOŘÁK, L.
- [8] Solenoid Valves Flow Characteristics, SMC s.r.o. Dostupné z: <http://www.alliedelec.com/m/d/b7d1de11bce905e2e5044a74609ee532.pdf>
- [9] KOLEKTIV AUTORŮ. *SMC Training - Stlačený vzduch a jeho využití*. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.
- [10] Katalogový list, Festo s.r.o., Dostupné z: [https://www.festo.com/cat/cs\\_cz/products\\_VPPE?CurrentPartNo=557772](https://www.festo.com/cat/cs_cz/products_VPPE?CurrentPartNo=557772)
- [11] Pneumatic Piping Equipment.SMC s.r.o., 2002. Dostupné z: [https://www.smc.eu/portal\\_ssl/WebContent/local/DK/download\\_kataloger/pdf/Pneumatisk\\_koblingsudstyr.pdf](https://www.smc.eu/portal_ssl/WebContent/local/DK/download_kataloger/pdf/Pneumatisk_koblingsudstyr.pdf)
- [12] 5 Port Solenoid Valve, SMC s.r.o. Dostupné z: [https://www.smc.eu/portal\\_ssl/WebContent/digital\\_catalog\\_2/jsp/view\\_product\\_configurator.jsp?dc\\_product\\_id=35847&part\\_number=sya%203120&filter\\_type=dc\\_search\\_filter&sub\\_filter\\_type=partnumber&filter\\_value=sya%203120](https://www.smc.eu/portal_ssl/WebContent/digital_catalog_2/jsp/view_product_configurator.jsp?dc_product_id=35847&part_number=sya%203120&filter_type=dc_search_filter&sub_filter_type=partnumber&filter_value=sya%203120)

[13] HRUŽÍK, L. *Měření veličin v hydraulice s využitím přístroje Hydrotechnik: učební opora*. Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 2012. 54 s.